

Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava

Univerzitní studijní předměty

Katedra Automatizační techniky a řízení

Analýza kondenzačního chladiče pro pyrolýzní jednotky

Analysis of the Condenser Cooler for a Pyrolysis Unit

Student:

Bc. Radek Svoboda

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Radim Farana, CSc.

Ostrava 2013

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Radek Svoboda**
Studijní program: **N3943 Mechatronika**
Studijní obor: **3906T006 Mechatronické systémy**
Téma: **Analýza kondenzačního chladiče pyrolýzní jednotky**
Analysis of the Condenser Cooler for a Pyrolysis Unit

Zásady pro vypracování:

1. Popište strukturu pyrolýzní jednotky, jednotlivé uzly a řídicí struktury.
2. Analyzujte kondenzační chladič z pohledu jeho řízení, vstupy, výstupy, závislosti.
3. Sestavte matematický model chladiče za předpokladu známého složení vstupující směsi plynů a realizujte odpovídající simulační model v prostředí Matlab/Simulink.
4. Pro typické konkrétní směsi plynů a jejich vstupní teploty určete závislost maximálního průtoku pro požadovanou výstupní teplotu směsi, včetně uvažování fázových změn.
5. Na základě provedené analýzy vytvořte doporučení k provozu stávajícího zařízení, navrhnete úpravy chladiče pro jeho lepší provoz a návrh vhodného regulátoru pro jeho řízení.
6. Při zpracování diplomové práce dbejte na utajení firemního know-how, utajované skutečnosti uveďte v oddělené technické zprávě.

Seznam doporučené odborné literatury:

ÅSTRÖM, K. J., HÄGGLUND, T. Advanced PID Control. ISA – The Instrumentation, Systems, and Society, Research Triangle Park, 2006.
BALÁTĚ, J. Automatické řízení. BEN – technická literatura, Praha, 2003. 664 s. ISBN 80-7300-020-2.
FEUER, A., GOODWIN, G. C. Sampling in Digital Signal Processing and Control. Birkhäuser Boston, Cambridge, 1996.
GOODWIN, G. C., GRAEBE, S. F., SALGADO, M. E. Control System Design. Prentice-Hall, 908 pp., Delhi, 2003.
O'DWYER, A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. 3rd Edition. Imperial College Press, London, 2009.
VÍTEČKOVÁ, M., VÍTEČEK, A. Vybrané metody seřizování regulátorů. VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Ostrava 2011, 230 s. ISBN 978-80-248-2503-8.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Radim Farana, CSc.**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 15.05.2013

prof. Ing. Jiří Tůma, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Petr Noskievič, CSc.
prorektor pro studium

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15.5.2013

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnou licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:15.5.2013

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Radek Svoboda

Adresa trvalého pobytu autora práce: U Bečvy 583/7, Hať

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

SVOBODA, Radek . *Analýza kondenzačního chladiče pro pyrolýzní jednotky*. Ostrava, 2013. 50 s. Diplomová práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Univerzitní studijní předměty, Katedra Katedra Automatizační techniky a řízení. Vedoucí práce prof.Ing. Radim Farana, CSc.

Pyrolýzní jednotka vznikla z grantu EU zaměřeného na využití netradičních zdrojů energie. Jejím účelem je vytvoření znovupoužitelné směsi uhlovodíků z různých druhů odpadu. Hlavním cílem analyzovaného chladiče je kondenzace tekutých složek směsi uhlovodíků a jejich oddělení od plynné fáze. Matematický model chladiče byl odvozen na základě fyzikálních vlastností a očekávaného složení plynu. Matematický model Matlab / Simulink ukázal určitá omezení v konstrukci chladiče, která určují maximální průtok chlazeného plynu. Tyto poznatky pomohly při přípravě provozní zkoušky pyrolýzní jednotky.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

SVOBODA, Radek . *Analysis of the Condenser Cooler for a Pyrolysis Unit*. Ostrava, 2013. 50 p. Master Thesis. VŠB – Technical university of Ostrava, University Study Programmes, Department of Control systems and instrumentation. Thesis head: prof.Ing. Radim Farana, CSc.

The pyrolysis unit is built during solution of a EU grant project focused to the use of non-traditional energy sources. Main purpose is to produce hydrocarbon mixture from different type of waste. The main objective of analyzed cooler is the condensation of liquid hydrocarbon mixture components and their separation from the gaseous phase. Mathematical model of the cooler has been derived based on physical properties and the expected gas composition. Mathematical model (Matlab/Simulink) showed some limitations in the cooler construction, which determine the maximum gas flow. These findings helped to prepare correct operational tests of the pyrolysis unit.

1 Obsah

2	Seznam použitých značek a symbolů	8
2.1	Řecká písmena:	9
3	Úvod	10
4	Struktura pyrolýzní jednotky – princip technologie	10
4.1	Popis technologie	12
5	Kondenzační chladič	16
5.1	Očekávané parametry chlazeného plynu	16
5.2	Možnosti řízení výstupní teploty	16
5.3	Použité snímače	17
5.4	Cíl řízení	17
6	PLC Simatic S7-200	19
6.1	Možné aplikace a omezení standardního PID regulátoru	19
6.1.1	Spojité regulátory P, PI, PD, PID	20
6.1.2	Pulzní regulátor	21
6.1.3	Dvou a tří-polohová regulace	21
6.2	Řídící struktury	22
6.2.1	Poměrové řízení	23
6.3	Identifikace systému s pomocí SIMATIC S7-200	23

7	Matematický model v prostředí Simulink.....	25
7.1	Model bez fázové přeměny.....	25
7.1.1	Seřízení regulátoru.....	30
7.1.2	Regulační rozsah	31
7.2	Model s fázovou přeměnou.....	33
7.3	Model softwaru EES	36
7.3.1	Doporučení k úpravě chladiče	36
8	Závěr	36
9	Poděkování.....	38
10	Citovaná literatura.....	39
11	Přílohy	41
11.1	Model softwaru simulink	41
11.2	Model softwaru EES.....	43

2 Seznam použitých značek a symbolů

Q_f –kondenzační teplo [J/kg]

T_1 - vstupní teplota pyrolýzního plynu [°K]

T_{10} - výstupní teplota pyrolýzního plynu [°K]

T_2 - vstupní teplota vzduchu [°K]

T_{20} -výstupní teplota vzduchu [°K]

V_1 - objem komory 1 [m³]

V_2 - objem komory 2 [m³]

c_{p1} - tepelná kapacita pyrolýzního plynu při průměrné teplotě [J·(kg·K)⁻¹]

c_{p2} - tepelná kapacita vzduchu při průměrné teplotě [J·(kg·K)⁻¹]

k_{12} -koeficient přestupu tepla mezi komorou 1 a komorou 2 [J·(s·K)⁻¹]

k_{23} -koeficient přestupu tepla mezi komorou 2 a okolím [J·(s·K)⁻¹]

q_1 - objemový tok pyrolýzního plynu na vstupu [Nm³/s]

q_{10} -objemový tok pyrolýzního plynu na výstupu [Nm³/s]

q_{13} - objemový tok pyrolýzní kapaliny na výstupu [Nm³/s]

q_2 - objemový tok vzduchu na vstupu [Nm³/s]

q_{20} -objemový tok vzduchu na výstupu [Nm³/s]

CCDF - controller call distribution function

DB - data blok

FB - funkční blok

PLC - programmable logic controller (programovatelný logický automat)

2.1 Řecká písmena:

θ_1 - tepelný tok vstupujícího pyrolýzního plynu [J/s]

θ_{10} - tepelný tok vystupujícího pyrolýzního plynu [J/s]

θ_{12} - tepelný tok z komory 1 do komory 2 [J/s]

θ_2 - tepelný tok vstupujícího vzduchu [J/s]

θ_{20} - tepelný tok vystupujícího vzduchu [J/s]

θ_{23} - tepelný tok uniklý do okolí [J/s]

θ_f - tepelný tok získaný fázovou přeměnou [J/s]

θ_l - tepelný tok vystupující pyrolýzní kapaliny [J/s]

ρ_1 - hustota pyrolýzního plynu za normálních podmínek [$\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}$]

ρ_2 - hustota vzduchu za normálních podmínek [$\text{kg} \cdot \text{Nm}^{-3}$]

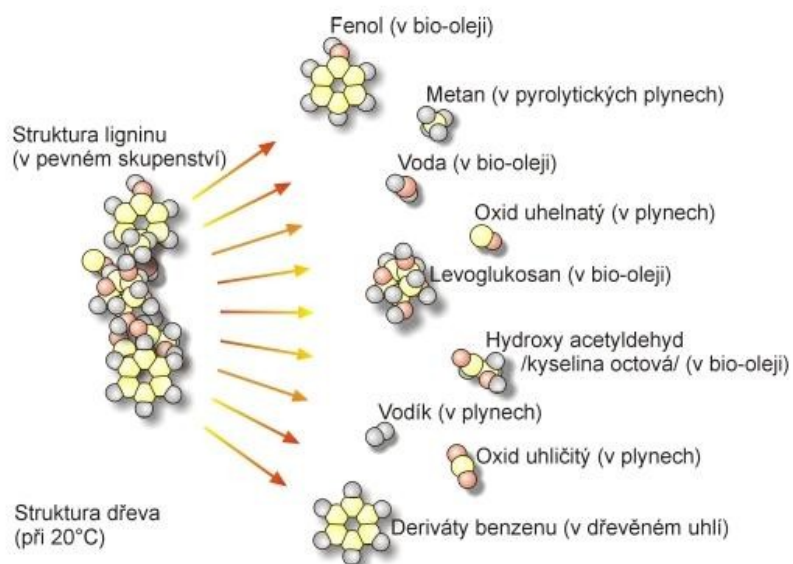
3 Úvod

Cílem práce je popsat pyrolýzní jednotku a analyzovat v ní probíhající děje a na tomto základě zjistit proveditelnost řízení pyrolýzního chladiče pomocí Simatic S7-200. V jednotlivých částech práce budu potřebovat:

- a. popsat pyrolýzní proces,
- b. popsat pyrolýzní jednotku,
- c. popsat použitelné vstupy a výstupy pyrolýzního chladiče,
- d. zjistit možnosti PLC Simatic S7-200,
- e. sestavit matematický model,
- f. pro konkrétní směsi plynů určit závislosti mezi průtokem a teplotou,
- g. na základě analýzy vytvořit doporučení, k provozu stávajícího zařízení a navrhnout úpravy.

4 Struktura pyrolýzní jednotky – princip technologie

Termické zpracování je fyzikálně-chemický děj, který řadíme do skupiny termických procesů. Termickou separací je míněn termický rozklad organických materiálů bez přístupu oxidačních médií, jimiž mohou být O_2 , CO_2 , vodní pára. Termický rozklad odpadních materiálů je obvykle exotermický proces, jehož podstatou je ohřev materiálu nad mez termické stability přítomných organických sloučenin, což má za následek štěpení vysokomolekulárních látek až na nízkomolekulárními produkty. Tento termický proces, při němž roste míra neuspořádanosti systému (entropie), probíhá v oblasti teplot 120-1200 °C. Tato reakce probíhá i v přírodě, avšak velmi pomalu. Tento fakt platí obecně pro všechny organické látky, bez ohledu na to, zda vznikly přírodním procesem jako biomasa nebo procesem syntetickým (umělým) jako plasty, či pryže.[1][15]



Obrázek 4-1 :schéma rozkladu molekul ligninu [1].

Termická separace zhruba pracuje ve třech teplotních stupních:

- Teplota do 120 °C: sušení materiálu, tvorba vodní páry, endotermické procesy.
- Teploty 120 – 500 °C: suchá destilace, štěpení bočních řetězců z vysokomolekulárních organických látek, přeměna makromolekulárních struktur na plynné a kapalně organické produkty a pevný uhlík.
- Teploty 500 – 1200 °C: štěpení produktů vzniklých suchou destilací, Organické látky se rozpadají za vzniku stabilního plynu H_2 , CO_2 , CO a CH_4 . [1]

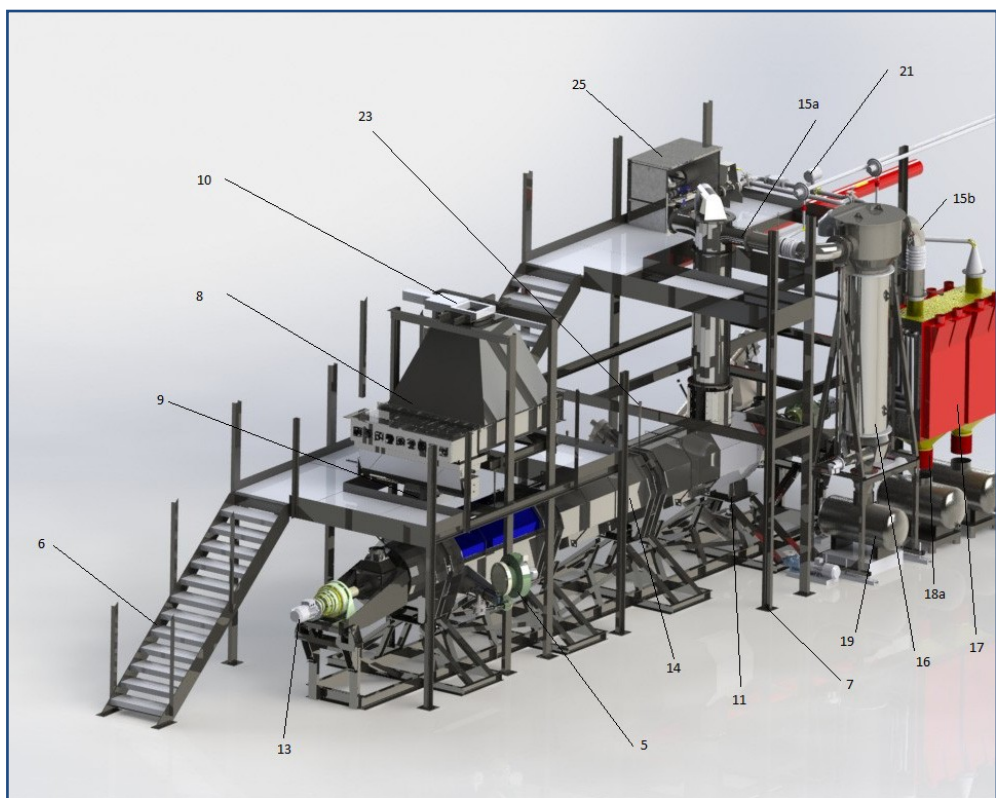
Konečnými produkty jsou pyrolýzní plyn (převážně uhlovodíky za normálních podmínek plynné), pyrolýzní kapalina (převážně uhlovodíky za normálních podmínek kapalně), a pyrolýzní koks (pevný zbytek, který se nepovedlo oddestilovat).

Na složení produktů pyrolýzy a jejich vzájemný poměr má vliv mnoho faktorů. Závisí na složení vstupního materiálu, poměru organické a anorganické složky a velikosti vstupních částic (rozmělnění vstupního materiálu). Výtěžnost jednotlivých frakcí (plynná, kapalná, pevná) je dále ovlivněna konečnou teplotou, rychlostí ohřevu, atmosférou ve které je pyrolýza prováděna, dobou zdržení pyrolýzních plynů v pyrolýzní komoře, tlakem a konstrukčním provedením pyrolýzního zařízení. Výtěžnost i vlastnosti produktů pyrolýzy může také významně ovlivnit přítomnost katalyzátoru a poměr materiál/katalyzátor.[15]

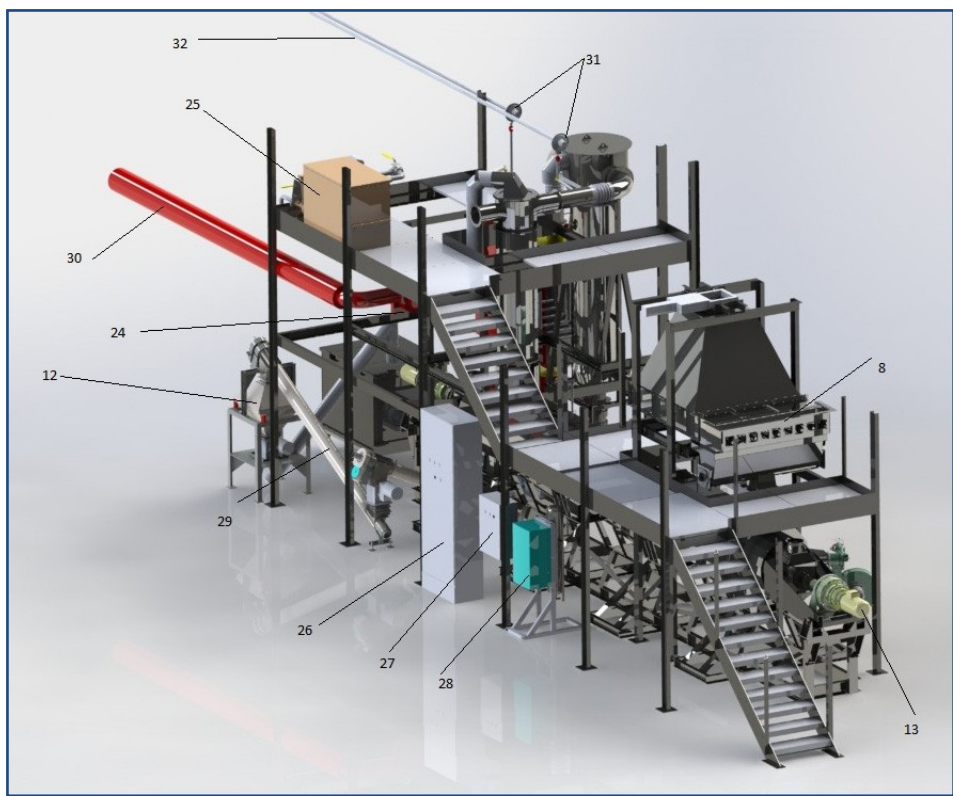
4.1 Popis technologie

Popis postupu materiálu při pyrolýze v zařízení Pyromatic 500. Pyrolyzovaný materiál je přiváděn do násypky (Tabulka 1 č. 8,10). Poté je šnekovými dopravníky dopraven do retorty (Tabulka 1 č. 14). V retortě je materiál zahříván a pyrolyzován. Zároveň je materiál v retortě posouván a míchán šnekovým dopravníkem. Pyrolýzní zbytek na výstupu z retorty, většinou tvořen popílkem (karbonizovanými zbytky), odchází záklopkou (Tabulka 1 č. 11). Při operacích s pyrolýzním zbytkem je potřeba dbát zvýšené opatrnosti. V případě přístupu vzduchu by mohlo dojít ke vznícení, a proto operace probíhají v ochranné atmosféře.

Z retorty odchází také pyrolýzní plyn (Tabulka 1 č. 15), jde o směs plynů obvykle obsahující celou škálu uhlovodíků. Nejtěžší uhlovodíky jsou zkapalněny v chladiči (Tabulka 1 č. 16), kapalná část je jímána v (Tabulka 1 č. 18,19). Chladnější směs lehčích uhlovodíků poté postupuje dále a je chlazena ve vodním chladiči (Tabulka 1 č. 17). Na výstupu jsou pouze pyrolýzní plyny plynné za normálních podmínek. Pyrolýzní kapalina kapalná za normálních podmínek je všechna jímána do nádrží.



Obrázek 4-2 :Pyrolýzní jednotka [1].

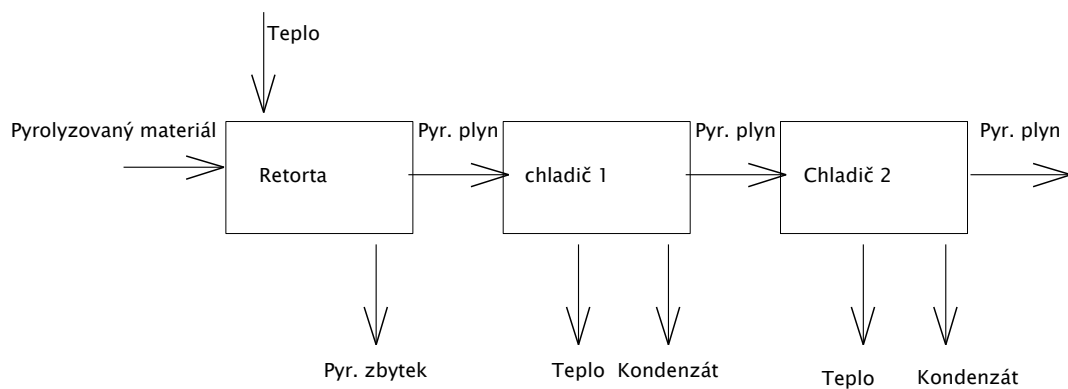


Obrázek 4-3 :Pyrolýzní jednotka[1].

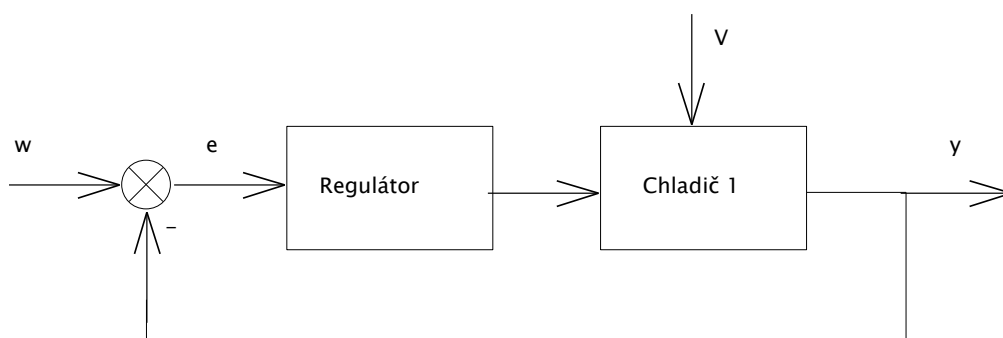
Tabulka 1 soupis zařízení uvedených na obr. 4-2 obr. 4-3

P. Č.	Název	Parametry
1	Max. šířka	3000mm
2	Max. délka	9800mm
3	Max. výška	5000mm
4	Hmotnost	2,5 t
5	Hořáková sekce RA 0300	1x (40-600kW)
6	Rám jednotky	Nosná konstrukce
7	Rám jednotky	Nosná konstrukce
8	Aktivní dno	
9	Vstup materiálu do pece	-
10	Klapka vstupu	-
11	Výstup pevné fáze z termické jednotky	-
12	Popelový box (tuhá fáze)	80 litrů
13	Pohon primárního šneku	Třífázové motory s kotvou na krátko
14	Opláštění pece	
15a	Odvod plynné fáze	Ø 139,7 mm
15b	Odvod plynné fáze	DN 50
16	Chladiče (plyn x vzduch)	
17	Chladič (plyn x voda)	Protiproudý chladič
18a	Odvod kapalné fáze	Ø 139,7 mm
19	Nádrž na kapalnou fázi	3x Válcovité nádoby 200 litrů
20	Odběrová sonda	-
21	Průtokoměry	G4
22	Tlakovoměry	-
23	Termočlánky	typ K 113 13

24	Odtahový ventilátor z ohřevu pece	Radiální ventilátor
25	Dmychadlo termického plynu	
26	Rozvaděč elektro	
27	Rozvaděč tlakový vzduch	
28	El. kotel na vyhřívání zásobníků kapaliny	Protherm
29	Vynášecí šneky uhlíku	
30	Spalinová cesta	
31	Poj. ventily přetlaku retorty	V5
32	Odvod tlaku z retorty	



Obrázek 4-4: Blokové schéma pyrolýzní jednotky.



Obrázek 4-5 :Nejjednodušší regulační schéma chladiče 1.

5 Kondenzační chladič

Diplomová práce se zabývá řízením chladiče pyrolýzní jednotky vyznačeného na obr. 4-2 pod číslem 17. Jeho úkolem je zkondenzovat nejtěžší uhlovodíky. Z technologie vyplývají následující podmínky a omezení.

5.1 Očekávané parametry chlazeného plynu

- Očekávaný průtok chladiče: $30-110\text{ m}^3/\text{h}$ (už zchlazeného plynu).
- Teplota plynu: $500-700^\circ\text{C}$.
- Jde o uhlovodíkovou směs několika plynů (proměnná směs pro každý běh zařízení). Složení plynu se však nebude měnit po dobu jednoho spuštění, což bude v řádu dní (ustálení složení plynu proběhne během jedné hodiny).

5.2 Možnosti řízení výstupní teploty

- Hořák Termjet TJ0015 [2]
Upravený pro výstupní výkon $2-20\text{ kW}$
- Dmychadlo Detalii Ventilator industrial CA-234-2T [3]
umožňuje chladit okolním vzduchem s průtokem až $280\text{ m}^3/\text{h}$
- Uzavření/izolování chladiče od okolí ve výstupní části pomocí servopohonu.



Obrázek 5-1 :Hořák Termjet TJ0015[4].



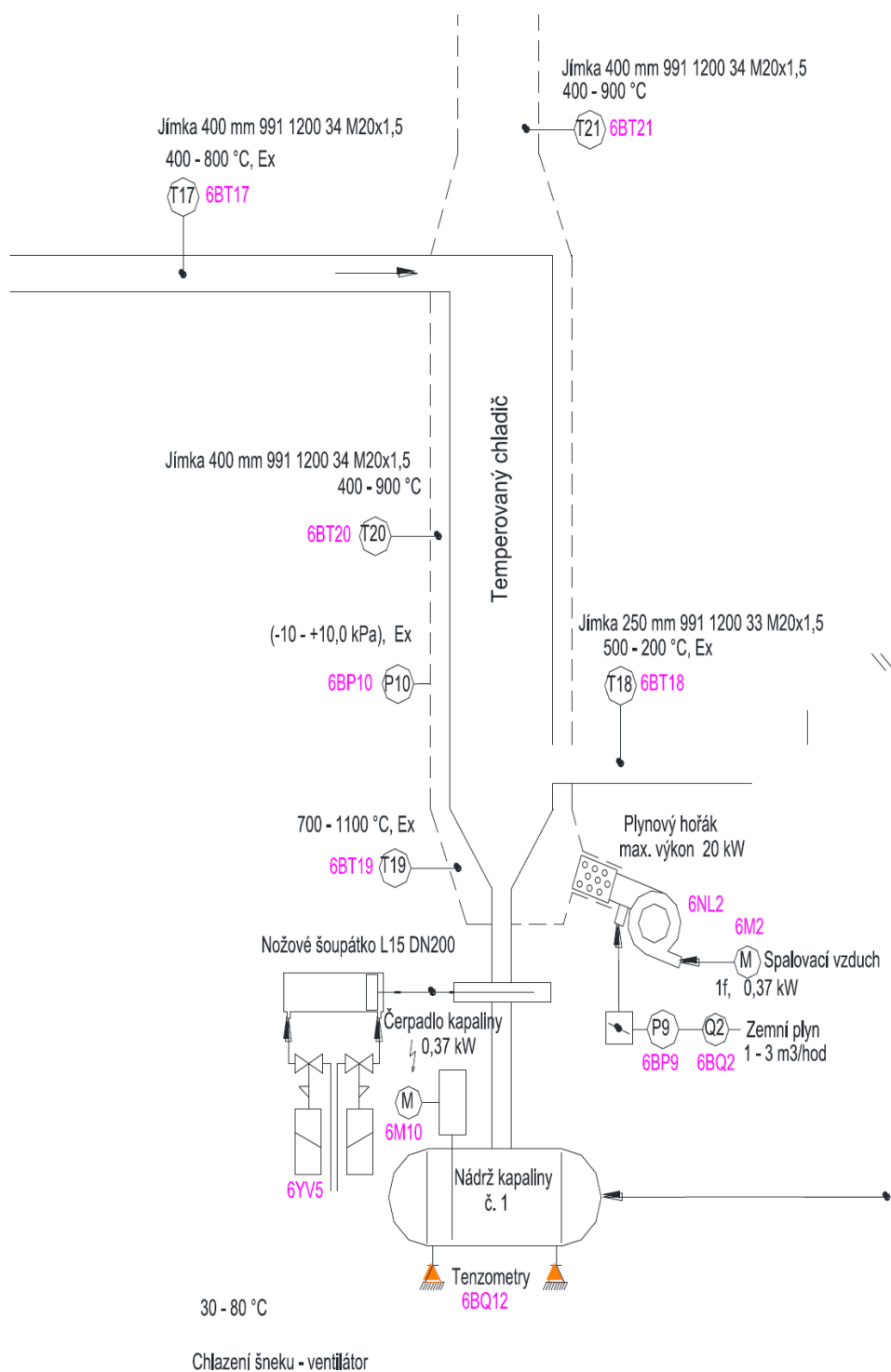
Obrázek 5-2 :Ventilator industrial CA-234-2T[5].

5.3 Použité snímače

- 2 teplotní sensory na vstupu a výstupu chladiče [T17,T18],
- 2 tlakové sensory na vstupu a výstupu plynu [P3,P4],
- tlakové a 3 teplotní čidla v plášti chladiče [T19,T20,T21,P10],
- průtokoměr na konci sestavy.

5.4 Cíl řízení

Řídit teplotu plynu na výstupu na ustálené hodnotě a tím docílit kondenzace nejtěžších uhlovodíků.



Obrázek 5-3 : Technologické schéma kondenzačního chladiče[1].

6 PLC Simatic S7-200

PLC Simatic umožňuje realizovat standardní i nestandardní PID regulátory. Softwarový produkt nazvaný "Standard PID Control" se v podstatě skládá ze dvou funkčních bloků (FB). Tyto bloky jsou tvořeny algoritmy pro regulaci a algoritmy pro zpracování signálu. Jde o software, který ve formě funkčního bloku tvoří regulátor. Chování regulátoru a jeho vlastnosti jsou realizovány nebo simulovány pomocí numerických algoritmů funkčního bloku. Údaje potřebné pro tyto cyklické výpočty jsou uloženy v control-loop-specific datových blocích. FB je nutné vytvořit pouze jednou pro několik regulátorů. Každý regulátor je reprezentován instancí DB, která musí být vytvořena samostatně. Pokud je použit "standard PID Control Tool", vytvoří se DB implicitně. To znamená, že konstrukce určitého regulátoru se dá zjednodušit na uvedení předdefinované struktury a hodnot parametrů v editačním oknu uživatelského rozhraní. Instance DB je vytvořena konfiguračním nástrojem. Procesor systému provede výpočet algoritmu regulátoru v intervalech nastavených vzorkovacím časem. Výpočtené výsledky i aktualizované hodnoty na vstupu a výstupu (proměnné měřené i pracovní) a stavové signály jsou uloženy v odpovídajícím stupni DB nebo převedeny do procesu periférií. Aby bylo možné zpracovat několik regulačních smyček, které mají být prováděny v různých intervalech - ale ekvidistantně - v závislosti na setrvačnosti daného procesu, byl vytvořen controller call distribution function (Loop Scheduler = LP_SCHED). Prostřednictvím CCLF se řeší rozsáhlé stromy úloh, což umožňuje strukturalizaci a zjednodušení. CCDF zajišťuje i vhodné využití CPU.[6]

6.1 Možné aplikace a omezení standardního PID regulátoru

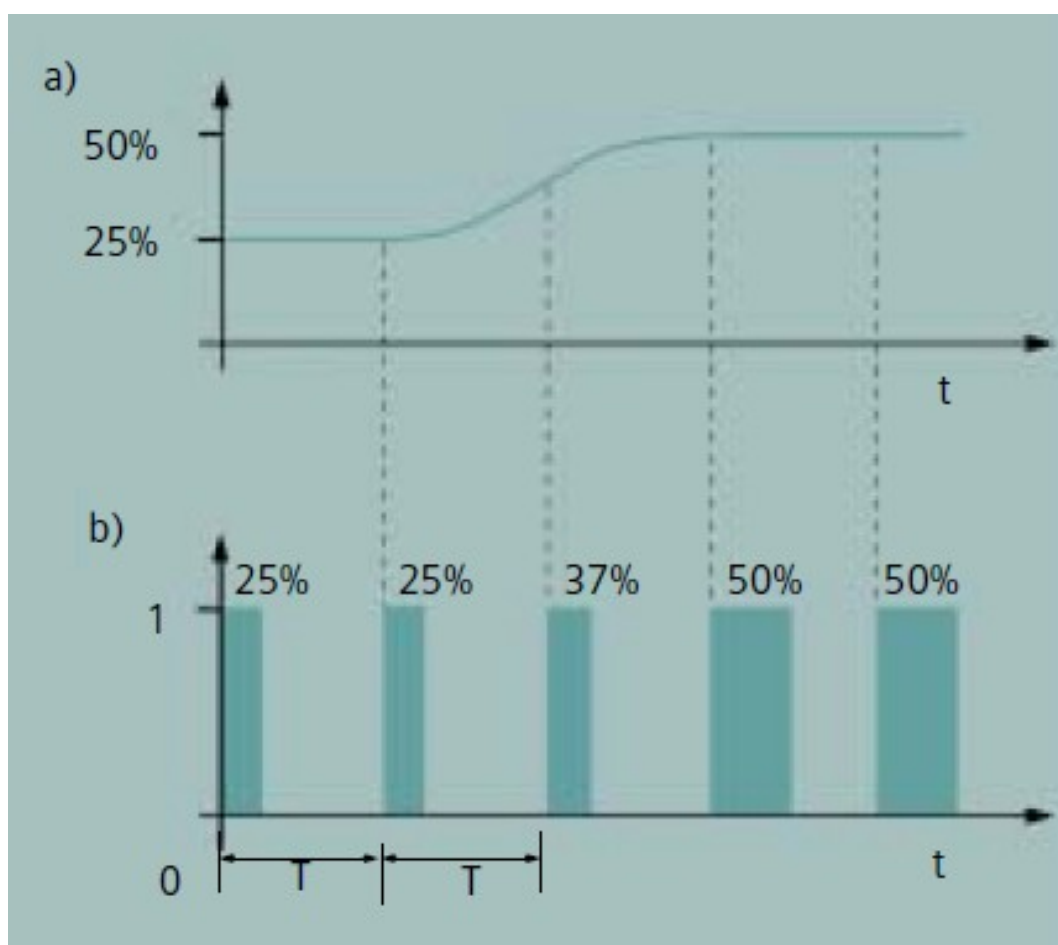
Řídící proceduru spuštěnou zpracováním FB lze v zásadě použít pro jakékoli aplikace. Kvalita a rychlost, s jakou je skutečná řídící smyčka zpracovávána závisí pouze na výkonu použitého procesoru. S jakýmkoli daným procesorem, musí dojít ke kompromisu mezi počtem regulátorů a frekvencí, při které jednotlivé regulátory pracují. Čím větší je frekvence zpracování řídící smyčky tím roste zatížení procesoru a tím menší je počet regulátorů, které mohou být nainstalovány.

Standardní funkční bloky PID_CP a PID_ES umožňují vytvářet a provozovat softwarové regulátory založené na konvenční PID algoritmu Standard PID Control.

Neexistují žádné omezení typu procesu, který může být ovládán. Pomalé procesy (řízení teploty, řízení úrovně nádrže) a velmi rychlé procesy (řízení průtoku, otáček motoru) jsou ovládány stejnou blokovou funkcí.

6.1.1 Spojité regulátory P, PI, PD, PID

Ve spojitém regulátoru (viz obr. 6-1a), je akční veličina (osa y) řízena v celém regulačním rozsahu. Výstupní hodnota je analogová a je spojitá, i když výpočet probíhá po krocích.



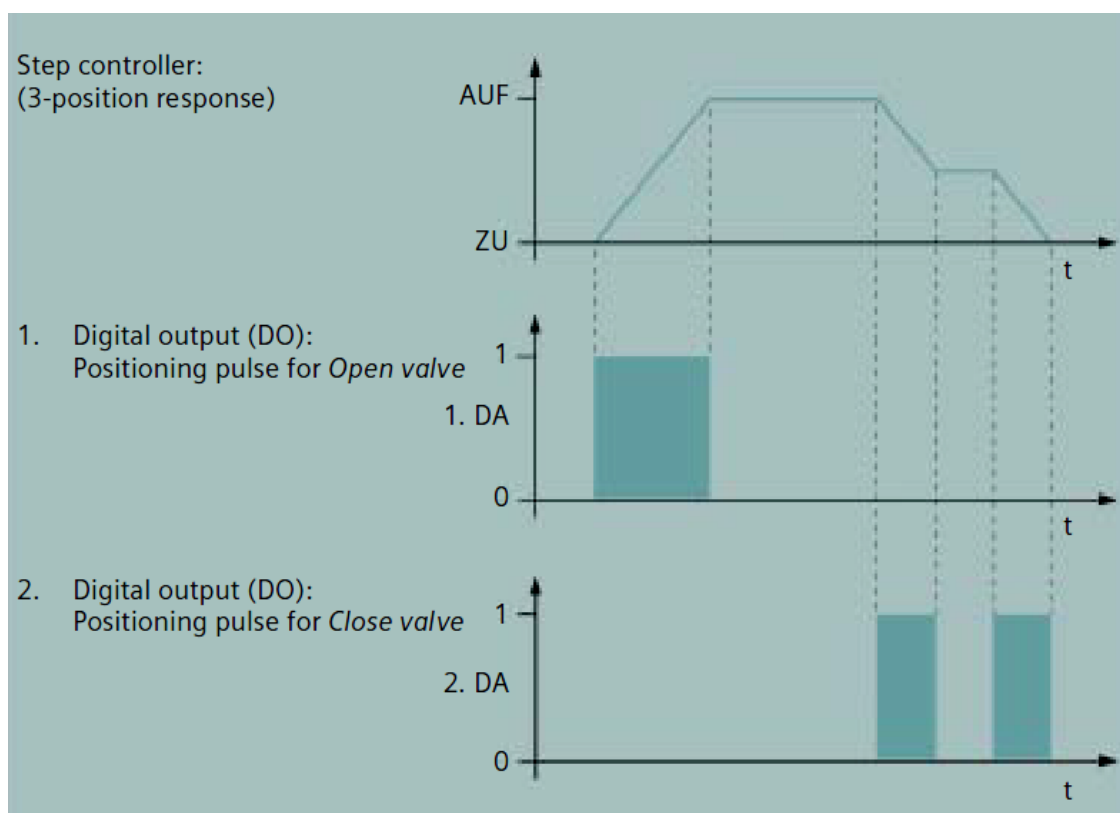
Obrázek 6-1: Funkce spojitého a pulzního regulátoru [6].

6.1.2 Pulzní regulátor

V pulzním regulátoru (viz. obr. 6-1b), je kontinuální výstupní signál převeden do 0/1 signálu. Výstup je určen poměrnou délkou pulsu (střída). V případě, že řízení teploty je realizováno pomocí elektrických topných elementů je pro každou teplotu nastaven zvláštní poměr střídy.

6.1.3 Dvou a tří-polohová regulace

Polohový regulátor (viz. obr. 6-2) má 3spínací stavy, např. **(proti směru hodinových ručiček - stop - po směru hodinových ručiček)**. Tyto prvky musí řídit soustavu s integrační charakteristikou. Krokové regulátory se používají, například pro ventily, klapky, atd. Motor jen přijme odpovídající impulz, když se skutečná hodnota odchyluje od žádané hodnoty.



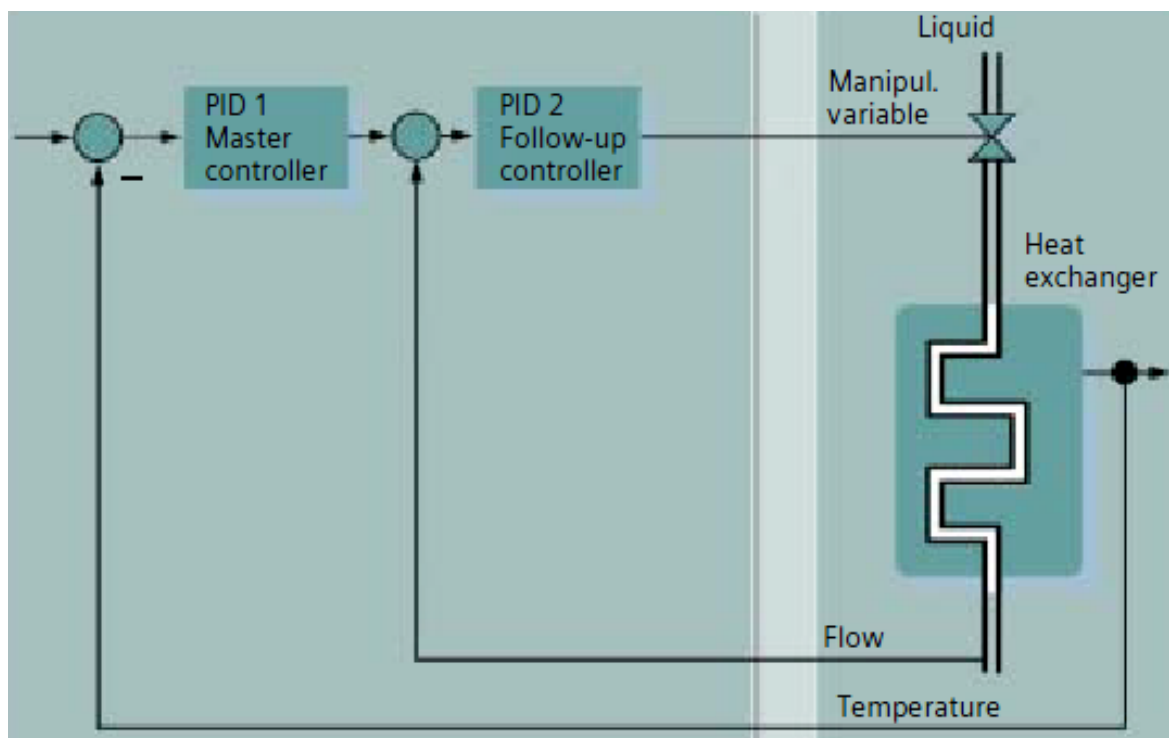
Obrázek 6-2: Polohový regulátor [6].

6.2 Řídící struktury

Řízení na fixní žádanou hodnotu je nejjednodušší řídicí struktura. Tato žádaná hodnota je jen zřídka mění v závislosti na řízeném procesu. Při řízení na fixní žádanou hodnotu se často používá jediné smyčky regulátoru. Jednoduchá smyčka se také používá jako hlavní regulátor v kaskádovitém řazení.

Následný regulátor na rozdíl od řízení na fixní žádanou hodnotu má proměnnou žádanou hodnotu, která se mění on-line. Zvláštní úkol „follow-up“ regulátoru spočívá v tom, aby regulovaná veličina byla trvale v souladu s žádanou, měnící se hodnotou. Follow-up regulátor je často používán jako podřízený regulátor v kaskádovité struktuře.

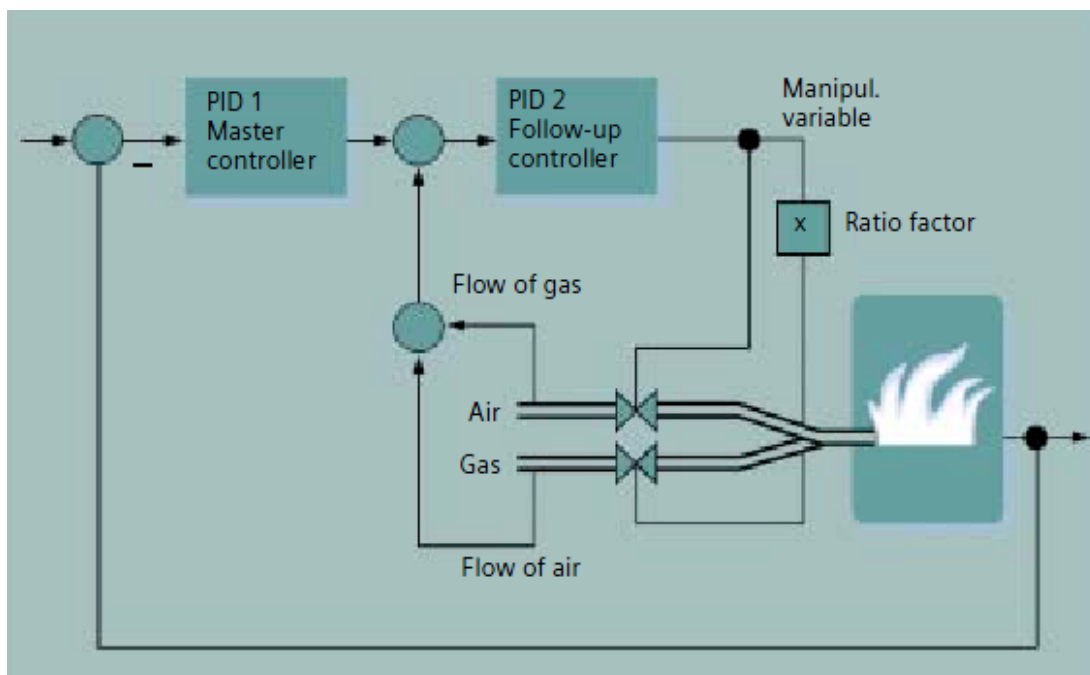
Kaskádovou regulaci použijeme, jestliže jsou výsledky při použití jedné smyčky neuspokojivé. Reakce může být zlepšena pomocí dalších proměnných z procesu. Kaskádová regulace je struktura obsahující hlavní regulátor a regulátor podřízený hlavnímu. Jako příklad poslouží ohřívač vody s kontrolou průtoku páry a její teploty na obr. 6-3.



Obrázek 6-3: regulátor s řízením na fixní hodnotu a následný regulátor [6].

6.2.1 Poměrové řízení

V některých procesech je poměr mezi dvěma nebo více řízenými proměnnými důležitější než jejich absolutní hodnoty. Tyto úkoly vyžadují poměrné řízení. Podřízená regulační smyčka (spodní obr. 6-4) ukazuje konstrukci poměrového řízení, kde je konstantní poměr vzduchu a plynu. Na obrázku je rozkreslena kombinace kaskádní struktury a podřízené poměrné regulační struktury. Regulaci teploty řídí hlavní regulátor a řízení poměru pro vzduch a plyn zajišťuje sledovací regulátor.



Obrázek 6-4: regulátor s řízením na fixní hodnotu a následný poměrový regulátor [6].

6.3 Identifikace systému s pomocí SIMATIC S7-200

Přidáním funkčního bloku PID Self-Tuner se rozšíří PID regulátor o samo-optimalizační funkci, která umožňuje uživatelům jednoduše nastavit PID regulátory a přizpůsobit je on-line během provozu. Regulátor může být přizpůsoben řízenému procesu rychle a snadno. PID Self-Tuner je ideální například pro optimalizaci regulátorů teplot, hladin, a objemových průtoků.

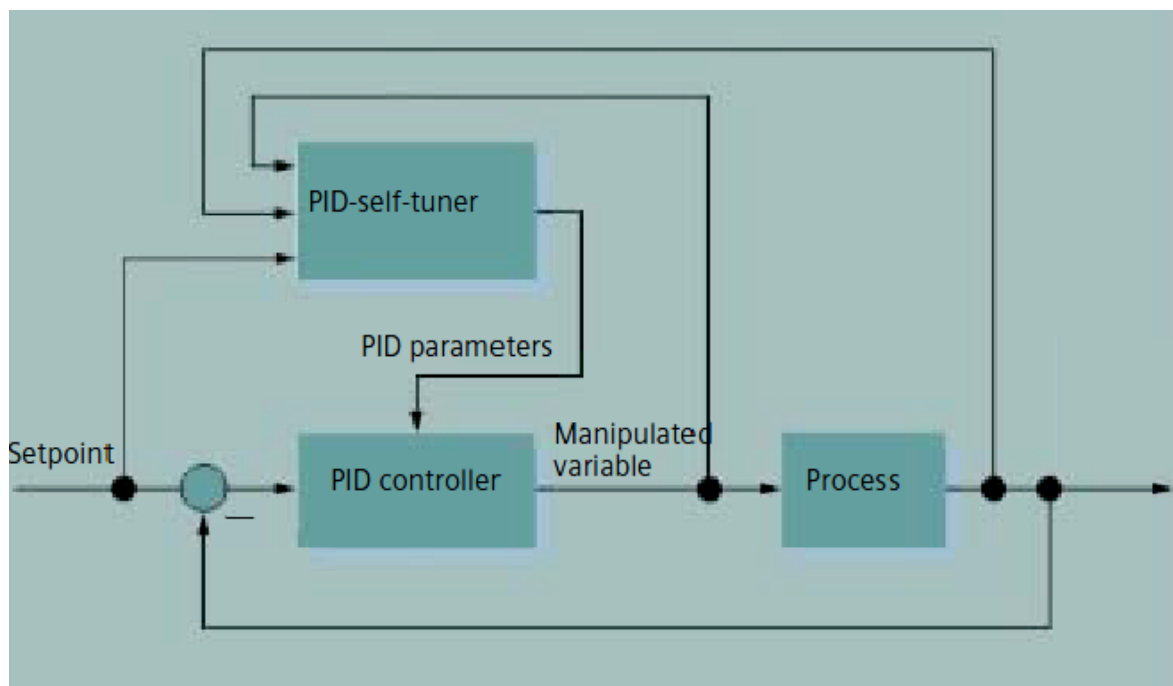
Proces musí splňovat několik následujících podmínek:

- Stabilní asymptotická přechodová charakteristika. Přiměřená časová konstanta.
- Dostatečná linearita ve zvoleném pracovní rozsahu
- Dostatečná kvalita měřených signálů
- Vhodné úvodní nastavení, aby nedošlo k nestabilitě před začátkem optimalizace.

PID Self-Tuner je univerzální, proto může být použit v kombinaci se všemi regulátory používanými na platformách SIMATIC S7-300 /S7-400 a C7.

Funkce:

- Počáteční on-line ladění PID regulátorů.
- Online adaptace PID regulátoru pro optimalizaci v pracovním bodě.
- Zvláštní optimalizace procesů ohřevu a aktivního chlazení.
- Manuální režim.
- Testovací funkce.



Obrázek 6-5:regulátor s PID self-tuner [6].

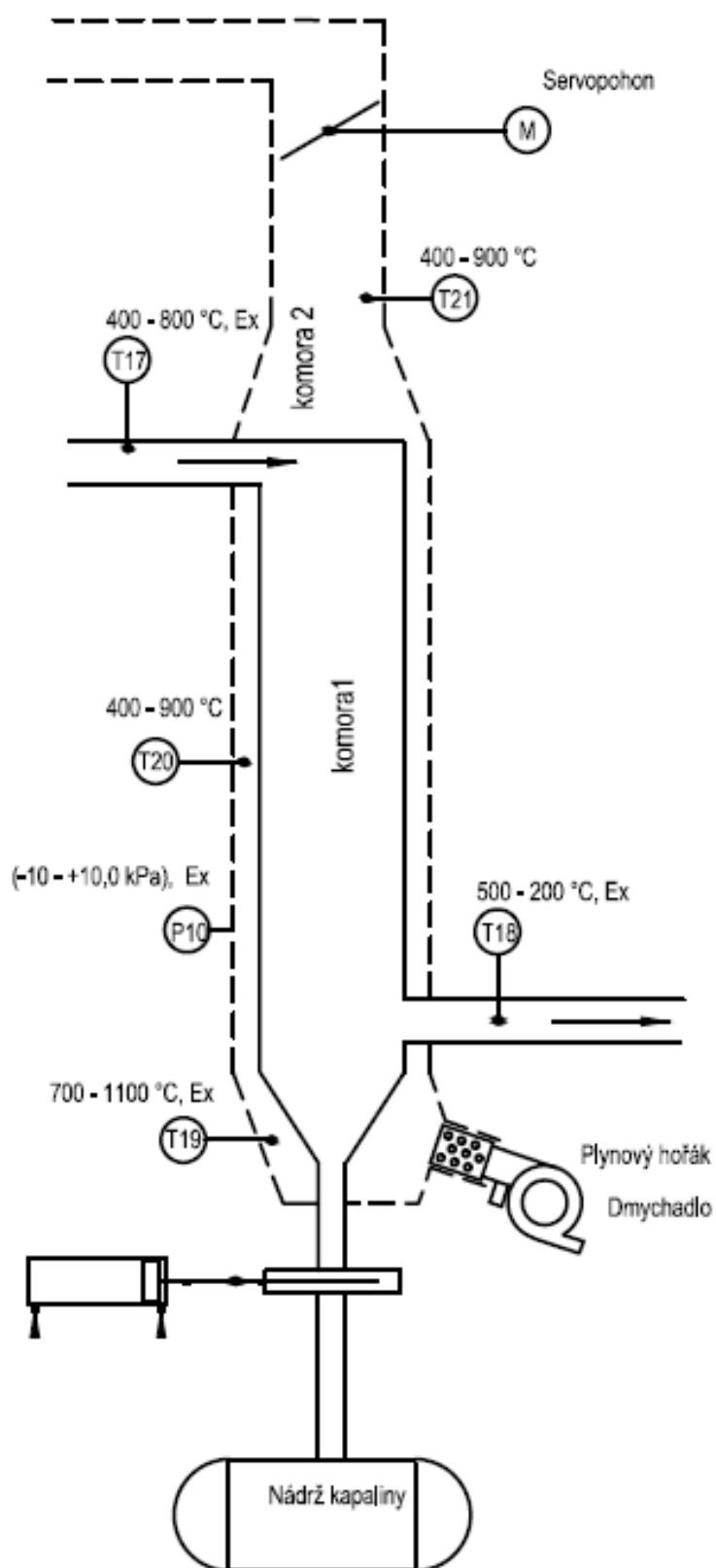
V rámci řešení této práce se očekávala také volba vhodného systému řízení. V dalším řešení se však ukázaly klíčové problémy s konstrukcí chladiče. K ověření jeho funkce postačoval PID regulátor.

7 Matematický model v prostředí Simulink

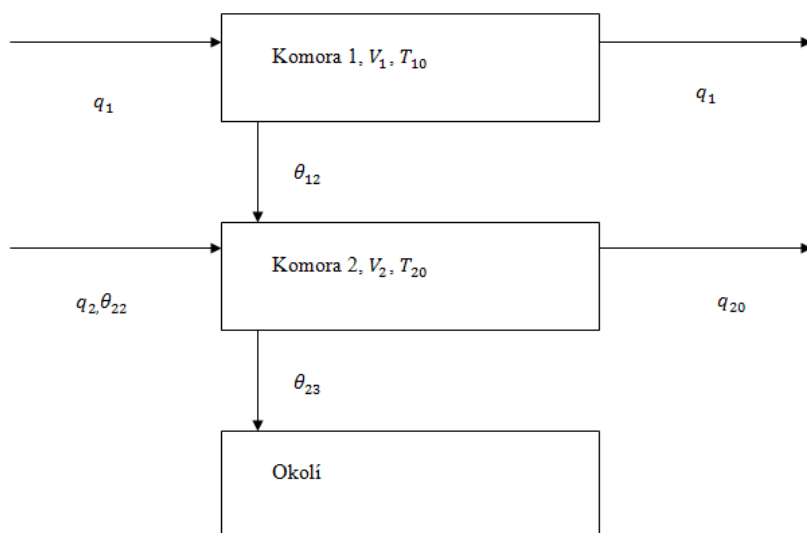
Protože v chladiči bude docházet k minimálním tlakovým ztrátám, idealizují model a uvažují v celém zařízení konstantní tlak. Tento přístup podporuje také skutečnost, že celá pyrolyzní jednotka pracuje v podtlakovém režimu. [17]

7.1 Model bez fázové přeměny

K přestupu tepla dochází mezi komorou 1 a komorou 2, také mezi komorou 2 a okolím. Další energetické vstupy jsou tvořeny proudem tekutiny chladicí a chlazené.



Obrázek 7-1: Schéma chladiče z pohledu řízení.



Obrázek 7-2: Blokové schéma chladiče.

Popis proměnných:

T_1 - vstupní teplota pyrolýzního plynu [$^{\circ}\text{K}$]

T_{10} - výstupní teplota pyrolýzního plynu [$^{\circ}\text{K}$]

T_2 - vstupní teplota vzduchu [$^{\circ}\text{K}$]

T_{20} -výstupní teplota vzduchu [$^{\circ}\text{K}$]

V_1 - objem komory 1 [m^3]

V_2 - objem komory 2 [m^3]

c_{p1} - tepelná kapacita pyrolýzního plynu při průměrné teplotě [$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]

c_{p2} - tepelná kapacita vzduchu při průměrné teplotě [$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]

k_{12} -koeficient přestupu tepla mezi komorou 1 a komorou 2 [$\text{J} \cdot (\text{s} \cdot \text{K})^{-1}$]

k_{23} -koeficient přestupu tepla mezi komorou 2 a okolím [$\text{J} \cdot (\text{s} \cdot \text{K})^{-1}$]

q_1 - objemový tok pyrolýzního plynu na vstupu [Nm^3/s]

q_{10} -objemový tok pyrolýzního plynu na výstupu [Nm^3/s]

q_2 - objemový tok vzduchu na vstupu [Nm^3/s]

q_{20} -objemový tok vzduchu na výstupu [Nm^3/s]

θ_1 - tepelný tok vstupujícího pyrolýzního plynu [J/s]

θ_{10} - tepelný tok vystupujícího pyrolýzního plynu [J/s]

θ_{12} - tepelný tok z komory 1 do komory 2 [J/s]

θ_2 - tepelný tok vstupujícího vzduchu [J/s]

θ_{20} - tepelný tok vystupujícího vzduchu [J/s]

θ_{23} - tepelný tok uniklý do okolí [J/s]

ρ_1 - hustota pyrolýzního plynu za normálních podmínek [$\text{kg}\cdot\text{Nm}^{-3}$]

ρ_2 - hustota vzduchu za normálních podmínek [$\text{kg}\cdot\text{Nm}^{-3}$]

Základní rovnice:

$$\rho_1 c_{p1} V_1 \frac{T_{10}}{dt} = \theta_1 - \theta_{10} - \theta_{12} \quad 7-1$$

$$\rho_2 c_{p2} V_2 \frac{T_{20}}{dt} = \theta_2 - \theta_{20} + \theta_{12} - \theta_{23} \quad 7-2$$

$$\rho_1 c_{p1} V_1 \frac{dT_{10}}{dt} = \rho_1 c_{p1} T_1 q_1 - \rho_1 c_{p1} T_{10} q_{10} - k_{12}(T_{10} - T_{20}) \quad 7-3$$

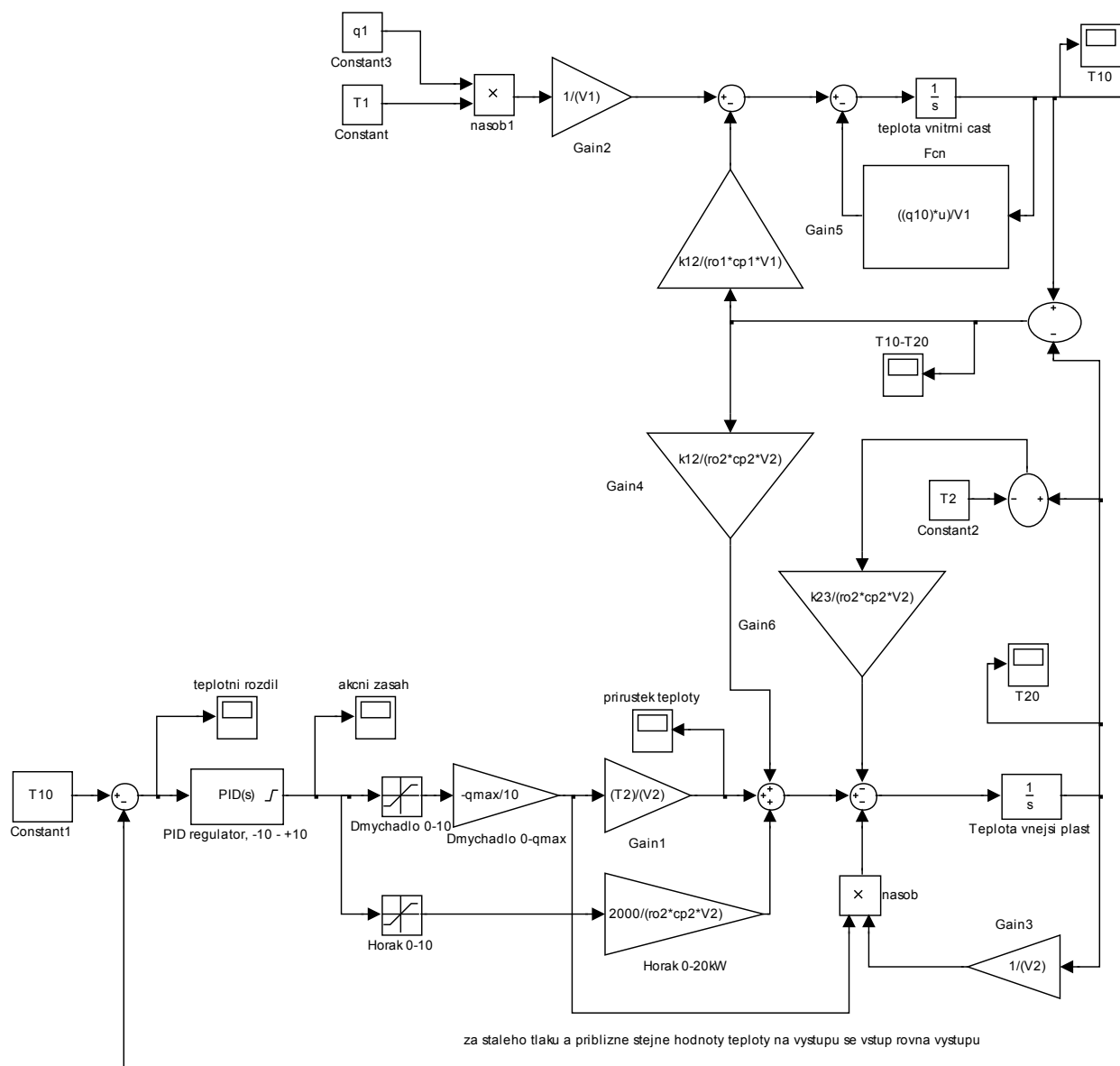
$$\rho_2 c_{p2} V_2 \frac{dT_{20}}{dt} = \rho_2 c_{p2} T_2 q_2 - \rho_2 c_{p2} T_{20} q_{20} + k_{12}(T_{10} - T_{20}) - k_{23}(T_{20} - T_2) \quad 7-4$$

Upravené rovnice pro matematický model:

$$\frac{dT_{10}}{dt} = \frac{T_1 q_1}{V_1} - \frac{T_{10} q_{10}}{V_1} - \frac{k_{12}(T_{10}-T_{20})}{\rho_1 c_{p1} V_1} \quad 7-5$$

$$\frac{dT_{20}}{dt} = \frac{T_2 q_2}{V_2} - \frac{T_{20} q_{20}}{V_2} + \frac{k_{12}(T_{10}-T_{20})}{\rho_2 c_{p2} V_2} - \frac{k_{23}(T_{20}-T_2)}{\rho_2 c_{p2} V_2} \quad 7-6$$

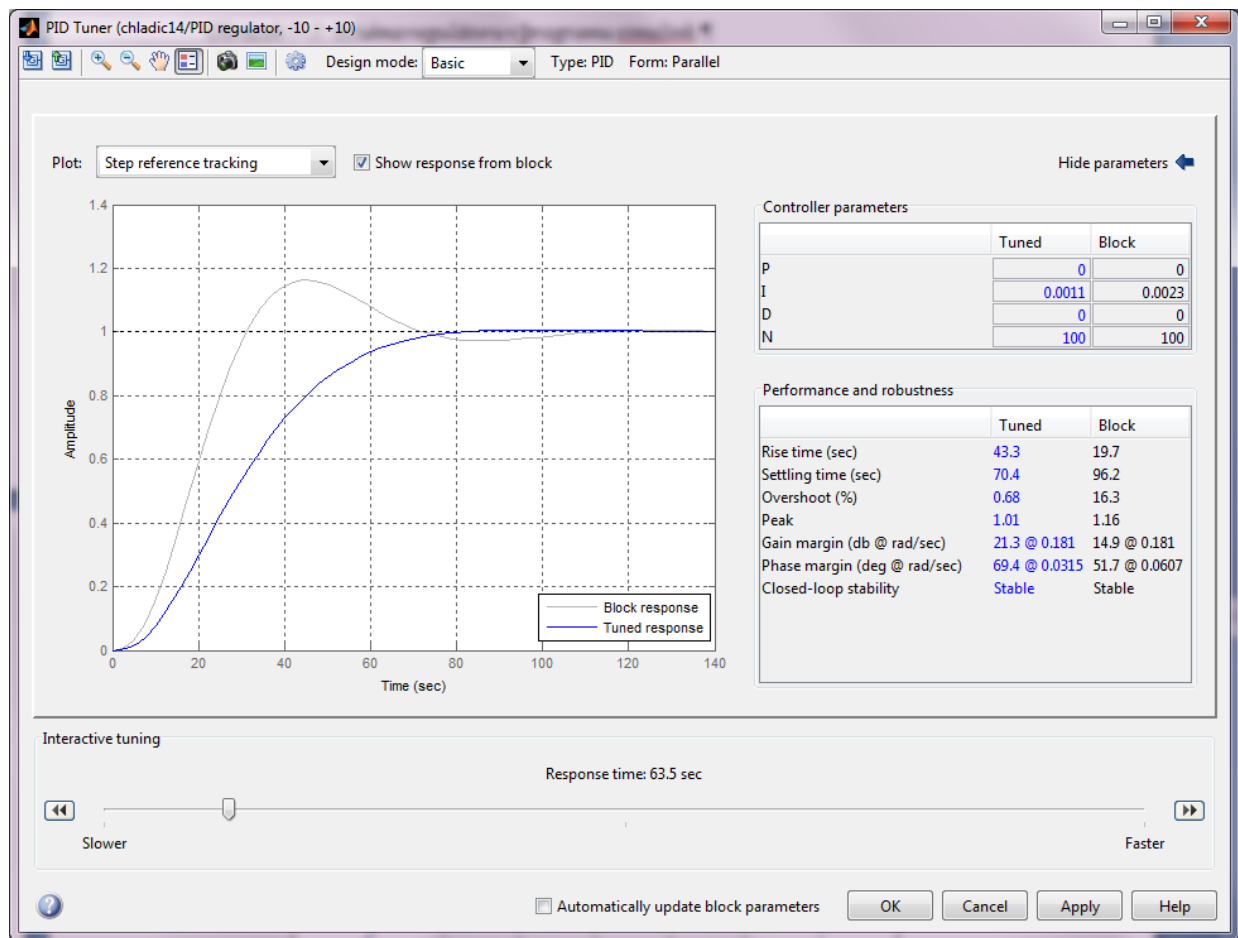
Hodnoty k_{12} a k_{13} byly vypočteny pro každý případ zvlášť pomocí programu EES.



Obrázek 7-3: Schéma celého systému včetně regulátoru.

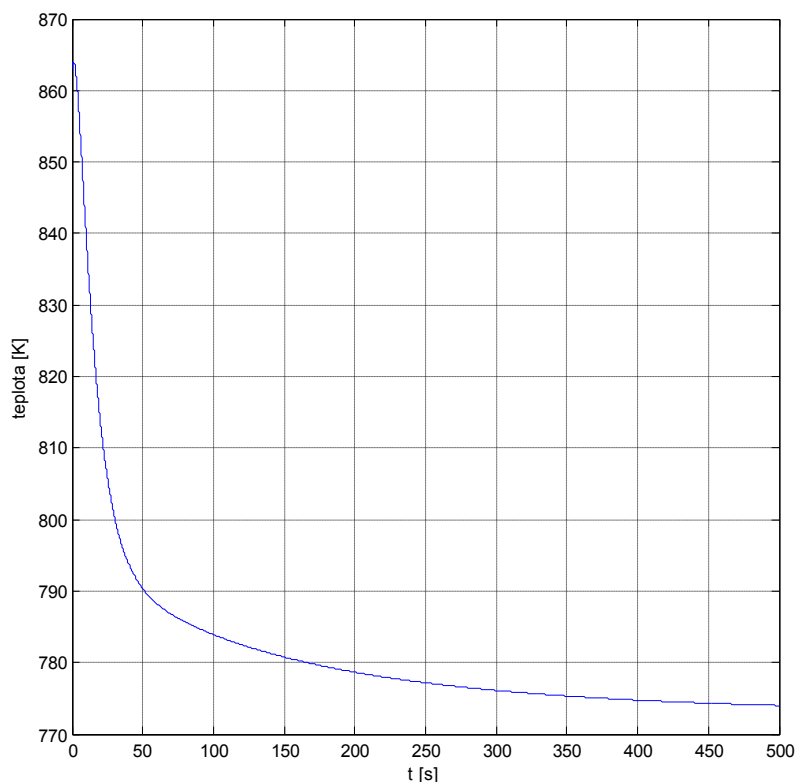
Na obr. 7-6 je graf teploty na výstupu po odeznění přechodného děje pro různé průtoky chlazeného média. Z obrázku vyplývá, že se zvyšujícím průtokem se zvyšuje maximální udržitelná teplota. Vstupní proměnné jsou uvedeny v příloze 11.1.

7.1.1 Seřízení regulátoru



Obrázek 7-4: Odezva regulátoru v softwarovém modulu PID tuner.

Matlab Simulink umožňuje použití nástroje PID Tuner. Tento nástroj velice zjednoduší nastavení regulátoru. Nejprve linearizuje model a poté velice jednoduše provedeme nastavení regulátoru podle požadované přechodové charakteristiky.

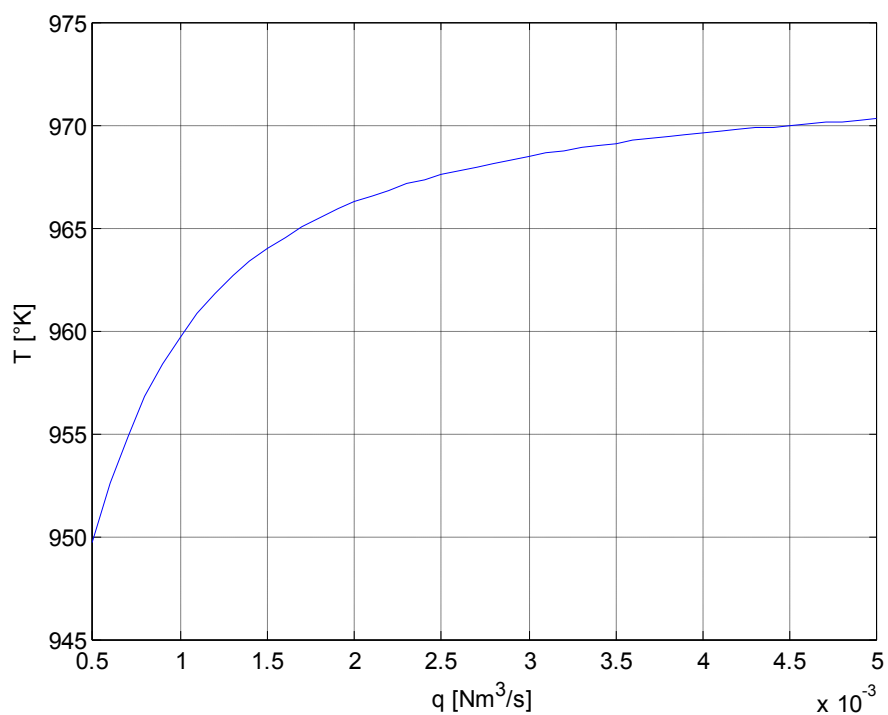


Obrázek 7-5: Odezva teploty chlazeného plynu při skoku žádané teploty z 600°C na 500°C.

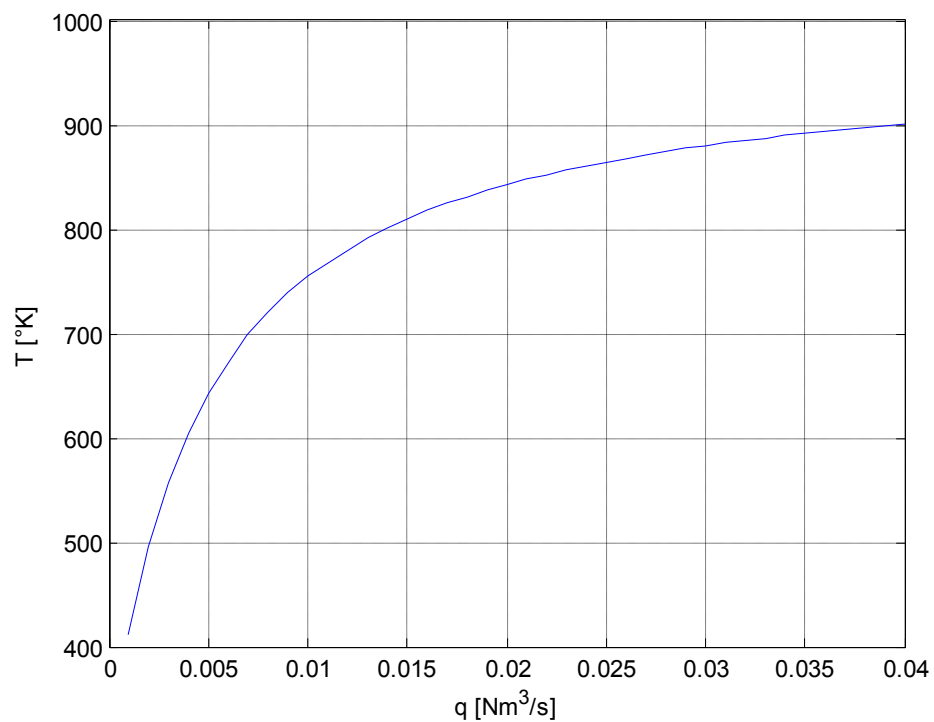
Po nastavení integračního členu regulátoru ($I=1/T_I$) a při použití propanu jako chlazeného plynu se přechodový děj ustálí za dobu zhruba 500s.

7.1.2 Regulační rozsah

Po proměření několika uvažovaných teplotních rozsahů pro různé typy plynů, začalo být zřejmé, že chladič ve stávající konfiguraci nedokáže splnit kladené požadavky. Pomocí matlabu jsem proto provedl měření výstupní teploty v ustáleném stavu. Jedná se o teplotu po různých plyny při maximálním výkonu chladiče. Plyn vstupuje do chladiče vždy při teplotě 700°C (obr. 7-6 a obr. 7-7).



Obrázek 7-6: směs plynů metanu CH_4 , butanu C_4H_{10} , Toluenu C_7H_8 , Propanu C_3H_8 .



Obrázek 7-7: Samostatný plyn, propan..

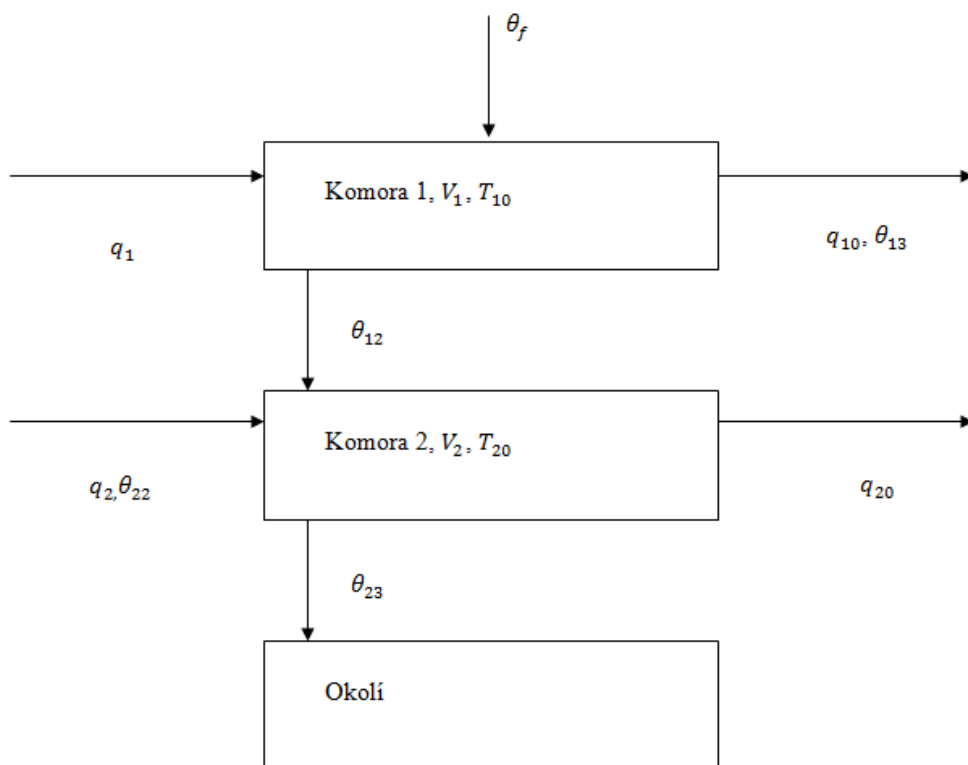
Na obr. 7-7 je graf teploty na výstupu po odeznění přechodného děje pro různé průtoky chlazeného média (propanu). Z obrázku vyplývá, že se zvyšujícím průtokem se zvyšuje maximální udržitelná teplota. Vstupní proměnné lze vidět v příloze 11.1. Protože plyn nese mnohem méně energie, jeho možný průtok je řádově větší.

Tvorba grafů (obr. 7-6 ,obr. 7-7) probíhala netradičním způsobem. Matlab-Simulink je modul postavený na základě operací s maticemi. Je proto přirozené, že mu můžeme na vstup $q1$ (obr. 7-3) vložit místo skalárního čísla celý vektor. Simulink potom postupuje tak, že počítá diferenciální rovnice pro každé číslo vektoru zvlášť. Samozřejmě to platí pouze v případě, že všechny prvky modelu jsou schopny s takovýmto vektorem počítat.

Na výstupu (scope T10 obr. 7-3) potom dostaneme pole, kde sloupce odpovídají jednotlivým hodnotám vstupu vektoru $q1$ a index sloupce odpovídá posunu času. Poslední řádek matice odpovídá maximálnímu času dané simulace (již po ukončení přechodového děje). V grafu jsou potom zobrazeny hodnoty výstupní teploty v závislosti na $q1$ z tohoto posledního řádku.

7.2 Model s fázovou přeměnou

Při uvažování fázové přeměny dochází ještě ke kondenzaci v komoře 1, což se projeví příspěvkem tepla z fázové přeměny plynu na kapalinu a odvodem tepla kondenzovanou kapalinou. Změní se také koeficient přestupu tepla.



Obrázek 7-8: Blokové schéma chladiče s fázovou přeměnou.

q_{13} - objemový tok pyrolýzní kapaliny na výstupu [Nm^3/s]

Q_f –kondenzační teplo [J/kg]

θ_l - tepelný tok vystupující pyrolýzní kapaliny [J/s]

θ_f - tepelný tok získaný fázovou přeměnou [J/s]

$$\rho_1 c_{p1} V_1 \frac{dT_{10}}{dt} = \theta_1 - \theta_{10} - \theta_{12} + \theta_f - \theta_l \quad 7-7$$

$$\rho_2 c_{p2} V_2 \frac{dT_{20}}{dt} = \theta_2 - \theta_{20} + \theta_{12} - \theta_{23} \quad 7-8$$

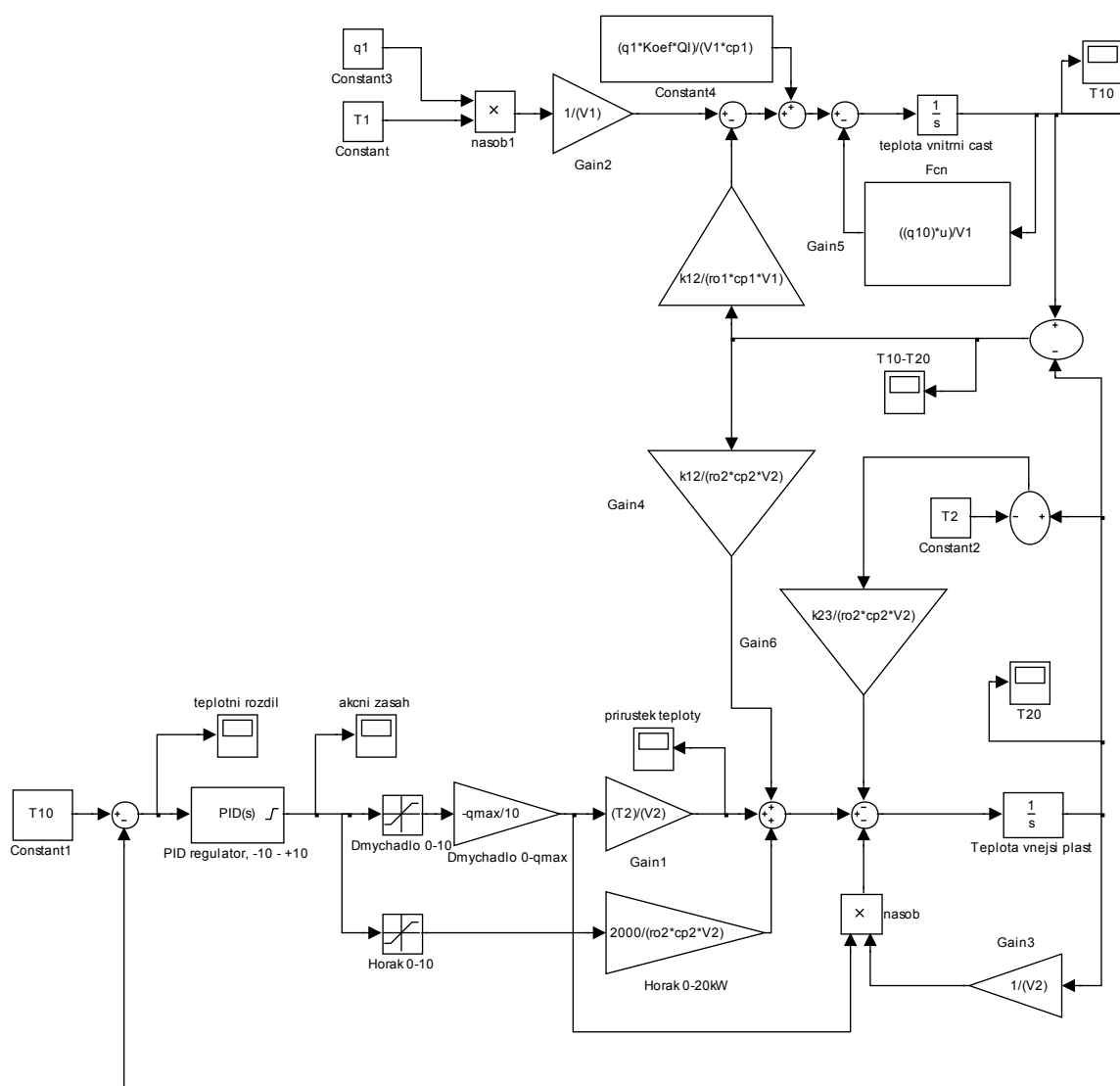
$$\rho_1 c_{p1} V_1 \frac{dT_{10}}{dt} = \rho_1 c_{p1} T_1 q_1 - \rho_1 c_{p1} T_{10} q_{10} - k_{12}(T_{10} - T_{20}) + \rho_1 Q_f q_{13} - \rho_1 c_{p1} T_{20} q_{13} \quad 7-9$$

$$\rho_2 c_{p2} V_2 \frac{dT_{20}}{dt} = \rho_2 c_{p2} T_2 q_2 - \rho_2 c_{p2} T_{20} q_{20} + k_{12}(T_{10} - T_{20}) - k_{23}(T_{20} - T_2) \quad 7-10$$

Upravené rovnice pro matematický model:

$$\frac{dT_{10}}{dt} = \frac{T_1 q_1}{V_1} - \frac{T_{10} q_{10}}{V_1} - \frac{k_{12}(T_{10} - T_{20})}{\rho_1 c_{p1} V_1} - \frac{Q_f q_{13}}{V_1 c_{p1}} - \frac{T_{10} q_{13}}{V_1} \quad 7-11$$

$$\frac{dT_{20}}{dt} = \frac{T_2 q_2}{V_2} - \frac{T_{20} q_{20}}{V_2} + \frac{k_{12}(T_{10} - T_{20})}{\rho_2 c_{p2} V_2} - \frac{k_{23}(T_{20} - T_2)}{\rho_2 c_{p2} V_2} \quad 7-12$$



Obrázek 7-9: Schéma celého systému včetně regulátoru pro model s fázovou přeměnou.

Kvalitativně se chování chladiče nezmění, kvantitativně bude muset chladič odebrat větší množství tepla. Proto dojde k dalšímu vyostření problému s nedostatečným výkonem chladiče.

7.3 Model softwaru EES

Software EES numericky řeší soustavy mnoha provázaných algebraických a diferenciálních rovnic. S výhodou jej lze použít při řešení termodynamických problémů, protože obsahuje velmi obsáhlé termodynamické tabulky. Program pracuje tak, že opakovaně řeší soustavu rovnic. Každou iterací zpřesňuje výsledek.

V příloze 11.2 je proveden výpočet maximálního průtoku vzduchu, který ještě bude mít chladicí účinek (vzhledem ke konstrukci chladiče). Ve výpočtu je zohledněna kondenzace (vliv na přestup tepla), typ proudění vzduchu (turbulentní-laminární) a rozdílné vlastnosti chemických látek. [7]

7.3.1 Doporučení k úpravě chladiče

Jako zásadní se jeví zvýšení průtoku chladicího média na hodnotu, která umožňuje maximální využití konstrukce stávajícího chladiče. Z výpočtů vyplývá, že je potřeba zvýšit průtok alespoň na $0,2036 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Výpočet je uveden v příloze 11.2 s výsledky na obr. 11-1. Dosažené výsledky byly firmou Arrowline verifikovány a potvrzeny. Výkon chladiče byl zvýšen instalací ventilátoru s daným výkonem. Následně byly také upraveny definice provozních režimů a došlo ke snížení průtoku pyrolýzní jednotkou.

8 Závěr

Pyrolýzní proces byl popsán takovým způsobem, že již nejsou pochybnosti o struktuře probíhajícího děje. Byly k tomu použity dostupné materiály i konzultace s odborníky.

Byla popsána pyrolýzní jednotka, se všemi přidruženými částmi, což umožnilo získat náhled na řízení jednotky jako celku.

Popsán byl i samostatný pyrolýzní chladič z hlediska vstupů, výstupů důležitých pro řízení.

PLC Simatic S7-200 bude dostačovat k řízení ohřevu i ochlazování chladiče. Umožňuje vytvořit libovolný regulátor, včetně kaskádního zapojení regulačních smyček, nebo poměrového regulátoru.

Po prověření několika uvažovaných teplotních rozsahů pro různé typy plynů, začalo být zřejmé, že chladič ve stávající konfiguraci nedokáže splnit kladené požadavky (kap. Očekávané parametry chlazeného plynu). Pomocí matlabu jsem proto provedl simulaci měření výstupní teploty v ustáleném stavu. Jedná se o teplotu pro různé plyny při maximálním výkonu chladiče. Pyrolýzní plyn vstupuje do chladiče vždy při teplotě 700°C (obr. 7-6 a obr. 7-7). Na obr. 7-7 je graf teploty na výstupu po odeznění přechodného děje pro různé průtoky chlazeného média (propanu). Z obrázku vyplývá, že se zvyšujícím průtokem se zvyšuje minimální udržitelná (uchladitelná) teplota. Protože plyn na obr. 7-7 nese mnohem méně energie, jeho možný průtok je řádově větší než směs plynů na obr. 7-6.

Po započtení vlivu fázových změn, změn typu proudění atd. se jako výhodné řešení jeví zvýšení průtoku chladicího média na hodnotu, která umožňuje maximální využití konstrukce stávajícího chladiče. Z výpočtů vyplývá, že maximálního výkonu chladiče dosáhneme zvýšením průtoku chladicího plynu alespoň na $0,2036 \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Výpočet je uveden v příloze 11.2 s výsledky na obr. 11-1.

Práce splnila všechny body zadání.

Dosažené výsledky byly prezentovány v příspěvku na konferenci International Carpatian Control Conference v Polsku. Zúčastnil jsem se také 18. ročníku mezinárodní soutěže pro studenty bakalářského a magisterského studia vysokých škol STOČ 2013 (Studentská tvůrčí a odborná činnost), konaný pod záštitou děkana Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

9 Poděkování

Na tomto místě bych chtěl zejména poděkovat svému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Radimu Faranovi, CSc. za jeho podporu a cenné rady při vedení diplomové práce.

Dále bych rád poděkoval všem pracovníkům a vedení Arrowline a.s. za připomínky, rady a původní podklady.

10 Citovaná literatura

1. ÅSTRÖM, K. J., HÄGGLUND T. Advanced PID Control. *Research Triangle Park*. Systems, and Society, 2006, Sv. ISA – The Instrumentation.
2. BALÁTĚ, J. *Automatické řízení*. Praha : BEN – technická literatura, 2003. 80-7300-020-2.
3. FEUER, A., GOODWIN, G. C. *Sampling in Digital Signal Processing and Control*. Cambridge : Birkhäuser Boston, 1996.
4. GOODWIN, G. C., GRAEBE, S. F., SALGADO, M. E. *Control System Design*. Delhi : Prentice-Hall, 2003.
5. O'DWYER, A. *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules 3rd Edition*. London : Imperial College Press, 2009.
6. VÍTEČKOVÁ, M., VÍTEČEK, A. *Vybrané metody seřizování regulátorů*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2011. 978-80-248-2503-8.
7. Sazima, Miroslav. *Sdílení tepla*. Praha : ČVUT, 1984.
8. Jiří, Čermák, Václav, Peterka a Jiří, Zázvorka. *Dynamika regulovaných soustav v tepelné energetice a chemii*. Praha : ACADEMIA, 1968.
9. venti-store. [Online] <http://www.venti-store.ro>.
10. ARROWLINE a.s. ARROWLINE. arrowline.cz. [Online] [Citace: 7. 11 2012.] www.arrowline.cz.
11. Siemens a.s. SIMATIC based technology: Loop control with SIMATIC. [siemens.com](http://www.siemens.com). [Online] [Citace: 11. 7 2012.] <http://w3.usa.siemens.com/us/internet-dms/ia/AutomationComm/Automation/Docs/Loop%20Control%20with%20SIMATIC.pdf>.

12. **Pyrolysis, Journal of Analytical and Applied.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Volume 79, Pages 387-394. May 2007, Sv. Volume 79.

13. **Eclipseburner a.s.** Hořák Termjet TJ0015. [Online]
<http://www.eclipseburner.com.tw/pdf/TJ/TJ/TJ0015.pdf>.

14. **venti-store.** venti-store.ro. *Detalii Ventilator industrial CA-234-2T.* [Online]
<http://www.venti-store.ro/ventilatoare-inalta-presiune-41/ventilator-industrial-ca-234-2t-423.htm>.

15. **Eclipseburner a.s.** *eclipseburner.* [Online] 2011. [Citace: 7. 11 2012.]
<http://www.eclipseburner.com.tw>.

11 Přílohy

11.1 Model softwaru simulink

```
%% inicializační proměnné pro model chladiče 1.2%%

%%proměnné pro tepelný tok

T1=700+273 ;           % K   teplota vstupního chlazeného plynu (směs uhlovodíků)

T1min=500;

T1max=700;

T10=20+273;           % K   teplota výstupního chlazeného plynu (směs uhlovodíků)

T10max=350+273;

T10min=250+273;

%q10=0.0306 ;          % m3*s-1 průtok výstupního chlazeného plynu (směs uhlovodíků) (30-110m3*h-1)=(0.0083-.
0.0306m3*s-1)

%q1=q10 ;             % m3*s-1 průtok vstupního chlazeného plynu (směs uhlovodíků)

q1=(0.005:0.001:0.045) ;

%cpm1=0.075e3 ;        % J*(mol*K)-1 propan při 1atm 1.01 atm 25stupnu celsia

%M=44.096 ;            %g*mol-1 molární hmotnost propanu

%cp1=cpm1*(M-1)*1e3      % J*(kg*K)-1 propan při 1atm 1.01 atm 25stupnu celsia (velice nepřesné)

%cp1=1.33e3 ;          %pyrolýzní plyn z pneumatik

cp1=3.371e3            %tepelná kapacita pro směs viz EES

%cp1=10e3              %výpočet polského kolegy

ro1=1.91 ;             % kg*m-3 hustota propanu 1atm při 15 stupních celsia(velmi nepřesné, potřeba tabulek)

%ro1=227 ;             %pyrolýzní plyn směs- (vypočtená kolegou Schee)

%ro1=1.04 ;            %pyrolýzní plyn z pneumatik

T2=20+273 ;           % K   teplota vstupního chladícího plynu (vzduch)
```

$T_{20}=T_{10}$; % K teplota výstupního chladicího plynu (vzduch)
 $q_2=0.0$; % m^3*s^{-1} průtok vstupního chladicího plynu v rozmezí 0-0.0777 (vzduch)
 $q_{20}=0.0$; % m^3*s^{-1} průtok výstupního chladicího plynu v rozmezí 0-0.0777 (vzduch)
 $cp_2=1.01e3$; % $J*(kg*K)^{-1}$ vzduch při 1atm 0 stupních celsia
 $ro_2=1.2047$; % $kg*m^{-3}$ hustota vzduchu při 1atm, 20 stupních celsia
 $lambdavzduch=4.29e-2$ % $W*(m.K)^{-1}$ vzduchu pro 300 stupňů celsia

%%proměnné pro akční členy

$q_{max}=0.07777$; % m^3*s^{-1} dmychadlo zvládne maximálně $280m^3*h^{-1}=0.0777m^3*s^{-1}$

%%proměnné pro přestup tepla mezi komorou 1 a 2

$pi=3.1415$; %konstanta pi
 $L_{12}=1.2$; %m délka komory 1
 $lambda=50$; % $W*m^{-1}*K^{-1}$ koeficient prostupu pro konstrukční ocel 0,2%C
 $d_1=0.400$; %m vnější průměr komory 1
 $d_2=0.406$; %m vnitřní průměr komory 2
 $alfa_1=14.99$; % $W*m^{-1}*K^{-1}$ mezi pyrolyzním plynem a stěnou
 $alfa_{12}=60$; % $W*m^{-1}*K^{-1}$ mezi stěnou a silně turbulentním vzduchem (vysoka rychlost)
 $k_{12}=(2*pi*L_{12}*lambda)/(log(d_2/d_1))$; %koeficient prostupu tepla
 $k_{12}=(2*pi*L_{12})/(1/(alfa_1*d_1^{0.5})+1/(alfa_{12}*d_2^{0.5})+(lambda^{-1})*log(d_2/d_1))$

%%proměnné pro přestup tepla mezi komorou 2 a okolím

$L_{23}=L_{12}$; %m délka komory 2
 $lambda=50$; % $W*m^{-1}*K^{-1}$
 $d_{23}=0.550$; %m vnější průměr komory 2
 $d_3=0.556$; %m vnější průměr pláště

```

%%k23=0.001*((2*pi*L23*lambda)/(log(d3/d23)))    %koeficient prostupu tepla

%k23=pi*d3*L23*17

d4=0.58;

lambdaiso=0.12;

alfa23=60 ;                                %W*m-1*K-1 pro extrémní turbulentní proudění

alfa3=5;                                    %W*m-1*K-1 pro volné sálání

k23=(2*pi*L23)/(1/(alfa23*d23*0.5)+1/(alfa3*d4*0.5)+((lambdaiso^-1)*log(d4/d3))+((lambda^-1)*log(d3/d23)))

%%objemy nádob

V1=pi*0.25*d1*d1*L12;                      % m3   vnitřní objem komory 1 (chlazeného plynu)

V2=pi*0.25*d23*d23*L23-pi*0.25*d2*d2*L23;    % m3   vnitřní objem komory 2 (chladičího plynu)

```

11.2 Model softwaru EES

```

{$DS,}"CHLADIČ VŠB"

"ZÁKLADNÍ BILANČNÍ VÝPOČET"

m_mat=200                                "množství zprac. materiálu [kg/h]"

x_2=0,61                                "procentuální podíl vzniklého plynu a kapaliny"

m_G=(m_mat*x_2)/3600                    "množství vzniklého plynu a kapaliny"

Q_CH=V_GN*cp_G*(T_G_IN-T_G_OUT)*1,2    "potřebný chladicí výkon [kW]"

"normální podmínky"

T_N=0

P_N=101,325

"STRANA PLYNU POTŘEBNÉ VELIČINY "

```

$T_{G_IN}=700$

$T_{G_OUT}=350$

$T[1]=(T_{G_IN}+T_{G_OUT})/2$

$P[1]=98,5$

$D_G=0,4$ "průměr potrubí"

$L_G=4,8$ "délka potrubí"

$S_G=(3,14*D_G^2)/8$ "průtočná plocha pro plyn"

$O_{o_G}=(3,14*D_G)/2+D_G$ "omočený obvod plynem m"

$d_{h_G}=(4*S_G)/O_{o_G}$ "hydraulický průřez"

$V_{GN}=m_G/\rho_{GN}$ "objemový tok plynu za NP [Nm³/s]"

$V_G=m_G/\rho_G$ "objemový tok plynu za R [m³/s]"

$V_{GH}=V_G*3600$ "objemový tok plynu za R [m³/h]"

$w_G=V_G/S_G$ "rychlost proudění plynu [m/s]"

{"MĚRNÁ TEPELNÁ KAPACITA PLYN"

$cp_{H_2}=Cp(\text{Hydrogen};T=T[1];P=P[1])$

$cp_{CO}=1,13$

$cp_{CO2}=Cp(\text{CarbonDioxide};T=T[1];P=P[1])$

$cp_{H2S}=Cp(\text{HydrogenSulfide};T=T[1];P=P[1])$

$cp_{CH4}=3,85$

$cp_{C2H6}=3,51$

$cp_{C3H8}=3,44$

$cp_{C4H10}=3,50$

$cp_{C4H10i}=3,481$

"MERNÁ TEPELNÁ KAPACITA KAPALINA"

cp_C5H12=3,476

cp_C5H8=3,94 "ISOPREN"

cp_C6H12=3,22 "hexen"

cp_C7H14=1 "hepten"

cp_OAL=1 "ostatní alifatické"

cp_C6H6=1 "Benzen"

cp_C7H8=1 "toulén"

cp_C8H10=1 "xylen"

cp_C9H8=1 "inden"

cp_C10H8=2,32 "naftalen"

cp_C12H10=1 "bifenyl"

cp_C4H4S=1 "Thiofen"

cp_C6H7N=1 "anilín"

cp_OA=1 "ostatní aromáty"}

"hustota plynu v reálných podmínkách [kg/m³]"

rho_CH4=Density(Methane;T=T[1];P=P[1])

rho_C4H10=Density(n-Butane;T=T[1];P=P[1])

rho_C7H8=Density(Toluene;T=T[1];P=P[1])

rho_C3H8=Density(Propane;T=T[1];P=P[1])

rho_G=(rho_CH4+rho_C4H10+rho_C7H8+rho_C3H8)/4

"hustota plynu za NP (normálních podmínek) [kg/Nm³]"

rho_CH4N=Density(Methane;T=T_N;P=P_N)

$\rho_{C_4H_{10}N} = \text{Density}(\text{n-Butane}; T=T_N; P=P_N)$

$\rho_{C_7H_8N} = \text{Density}(\text{Toluene}; T=T_N; P=P_N)$

$\rho_{C_3H_8N} = \text{Density}(\text{Propane}; T=T_N; P=P_N)$

$\rho_{GN} = (\rho_{CH_4N} + \rho_{C_4H_{10}N} + \rho_{C_7H_8N} + \rho_{C_3H_8N})/4$

"měrná tepelná kapacita plynu [kJ/(kg*K)]"

$cp_{CH_4} = Cp(\text{Methane}; T=T[1]; P=P[1])$

$cp_{C_4H_{10}} = Cp(\text{n-Butane}; T=T[1]; P=P[1])$

$cp_{C_7H_8} = Cp(\text{Toluene}; T=T[1]; P=P[1])$

$cp_{C_3H_8} = Cp(\text{Propane}; T=T[1]; P=P[1])$

$cp_G = (cp_{CH_4} + cp_{C_4H_{10}} + cp_{C_7H_8} + cp_{C_3H_8})/4$

"měrná tepelná kapacita plynu [kJ/(m³K)]"

$cp_G = cp_G \cdot \rho_{GN}$

"dynamická viskozita plynu [Pa.s]"

$\mu_{CH_4} = \text{Viscosity}(\text{Methane}; T=T[1]; P=P[1])$

$\mu_{C_4H_{10}} = \text{Viscosity}(\text{n-Butane}; T=T[1]; P=P[1])$

$\mu_{C_7H_8} = \text{Viscosity}(\text{Toluene}; T=T[1]; P=P[1])$

$\mu_{C_3H_8} = \text{Viscosity}(\text{Propane}; T=T[1]; P=P[1])$

$\mu_G = (\mu_{CH_4} + \mu_{C_4H_{10}} + \mu_{C_7H_8} + \mu_{C_3H_8})/4$

"kinematická viskozita plynu [m².s]"

$\nu_G = \mu_G / \rho_G$

"součinitel prostupu tepla plynu [W/(m*K)]"

$k_{CH4} = \text{Conductivity}(\text{Methane}; T=T[1]; P=P[1])$

$k_{C4H10} = \text{Conductivity}(\text{n-Butane}; T=T[1]; P=P[1])$

$k_{C7H8} = \text{Conductivity}(\text{Toluene}; T=T[1]; P=P[1])$

$k_{C3H8} = \text{Conductivity}(\text{Propane}; T=T[1]; P=P[1])$

$k_G = (k_{CH4} + k_{C4H10} + k_{C7H8} + k_{C3H8})/4$

"prandtlovo kritérium pro plyn"

$Pr_{CH4} = \text{Prandtl}(\text{Methane}; T=T[1]; P=P[1])$

$Pr_{C4H10} = \text{Prandtl}(\text{n-Butane}; T=T[1]; P=P[1])$

$Pr_{C7H8} = \text{Prandtl}(\text{Toluene}; T=T[1]; P=P[1])$

$Pr_{C3H8} = \text{Prandtl}(\text{Propane}; T=T[1]; P=P[1])$

$Pr_G = (Pr_{CH4} + Pr_{C4H10} + Pr_{C7H8} + Pr_{C3H8})/4$

"Výpočet součinitele přestupu tepla na straně plynu"

$Re_G = (w_G * d_{h_G}) / \nu_G$ "reynoldsovo kritérium"

$k_{l_G} = Re_G * Pr_G * d_{h_G} / L$ "Určující koeficient pro nuseltovo kritérium v přechodové oblasti"

$NusP_G = 21 * ((Pr_G * d_{h_G} / L_G)^{0,33}) * (Re_G / 2300)^x$ "Nuseltovo kritérium dle Kutateladze pro přechodovou oblast"

$x = 1,293$ "x= log(L/D) "

$\alpha_G = ((NusP_G * k_G) / d_{h_G})^{1,4}$ "součinitel přestupu tepla [W/m2K] předpokládám nárůst hodnoty a 40% vlivem sálavé složky a samotné kondenzace těžkých uhlovodíků "

"STRANA VZDUCHU, POTŘEBNÉ VELIČINY"

$T_{VZ_IN} = 20$ "vstupní teplota vzduchu [°C]"

$T_{VZ_OUT} = 200$ "výstupní teplota vzduchu [°C]"

$T[2]=(T_VZ_IN+T_VZ_OUT)/2$	"střední teplota vzduchu [°C]"
$P[2]=98,5$	
$D_VZ=0,406$	"vnější průměr potrubí"
$S_VZ=a*b$	"průtočná plocha pro vzduch"
$a=0,063$	"výška kanálu"
$b=0,371$	"šířka kanálu"
$l=6,850$	"délka hrany šroubovice [m] délka kanálu"
$R=0,239$	"poloměr zakřivení proudu"
$O_o=2*(a+b)$	"omočený obvod"
$d_h=(4*S_VZ)/O_o$	"hydraulický průřez"
$m_vz=Q_CH/(cp_VZX*(T_VZ_OUT-T_VZ_IN))$	"hmotnostní tok [kg/s]"
$V_Vz_N=m_VZ/\rho_vz_N$	"objemový tok za NP [Nm ³ /s]"
$V_VZ=m_VZ/\rho_VZ$	"objemový tok [m ³ /s]"
$V_VZH=V_VZ*3600$	"objemový tok [m ³ /h]"
$w_VZ=V_VZ/S_VZ$	"rychlost proudění vzduchu v chladicí části [m/s]"
"TERMODYNAMICKÉ VLASTNOSTI VZDUCHU"	
$cp_VZX=Cp(Air_ha;T=T[2];P=P[2])$	"měrná tepelná kapacita vzduchu [kJ/(kg.K)]"
$\rho_VZ=Density(Air_ha;T=T[2];P=P[2])$	"hustota vzduchu [kg/m ³]"
$\rho_VZ_N=1,2928$	"hustota vzduchu za N.P. [kg/m ³]"
$cp_VZ=cp_VZX*\rho_VZ_N$	"měrná tepelná kapacita vzduchu [kJ/(m ³ .K)]"
$\mu_VZ=Viscosity(Air_ha;T=T[2];P=P[2])$	"dynamická viskozita vzduchu [Pa.s]"
$\nu_VZ=\mu_VZ/\rho_VZ$	"kinematická viskozita [m ² .s]"
$k_VZ=Conductivity(Air_ha;T=T[2];P=P[2])$	"součinitel prostupu tepla vzduchu"

"Výpočet součinitele přestupu tepla na straně vzduchu"

$Re_{VZ} = (w_{VZ} * d_h) / \nu_{VZ}$ "Reynoldsovo kritérium"

$Pr_{VZ} = Prandtl(Air_{ha}; T=T[2]; P=P[2])$ "Prandtlovo kritérium"

$T_{S_VZ} = 100 + 273,15$ "teplota stěny chladiče předpoklad větší součinitel přestupu tepla na straně vzduchu proto se
teplota stěny bude blížit střední teplotě vzduchu [K]"

$k_1 = T_{S_VZ} / (T[2] + 273,15)$ "koeficient pro určení ϵ_{s_t} "

$\epsilon_{s_t} = (T_{S_VZ} / (T[2] + 273,15))^{(-0,55)}$ "teplotní součinitel pro plyny"

$Re_{kr_ii} = 18500 * (d_h / (2 * R))^{0,28}$ "kritická hodnota RE"

$\epsilon_{s_R} = 1 + 1,8 * (d_h / R)$ "opravný součinitel pro oblouky"

$k_2 = l / d_h$ "koeficient pro určení ϵ_{s_l} "

$\epsilon_{s_L} = 1$ "opravný součinitel pro krátké trubky"

$NusT_{VZ} = 0,021 * (Re_{VZ}^{0,8}) * (Pr_{VZ}^{0,43}) * \epsilon_{s_t} * \epsilon_{s_R} * \epsilon_{s_L}$ "Nuseltovo kritérium pro turbulentní proudění"

$\alpha_{VZ} = (NusT_{VZ} * k_{VZ}) / d_h$ "součinitel přestupu tepla"

"výpočet tepelného toku"

$S_{tep} = l * b$ "teplosměnná plocha"

$t_{log} = ((T_{G_in} - T_{VZ_out}) - (T_{G_out} - T_{VZ_in})) / \ln((T_{G_in} - T_{VZ_out}) / (T_{G_out} - T_{VZ_in}))$ "střední logaritmický
teplotní spád"

$q_{\alpha_{VZ}} = \alpha_{VZ} * S_{tep} * t_{log}$ "tepelný tok na straně vzduchu z teplosměnné plochy, předběžný výpočet"

$q_{\alpha_G} = \alpha_G * S_{tep} * t_{log}$ "tepelný tok na straně plynu do teplosměnné plochy předběžný výpočet"

$$k_c = 3,14 / ((1 / (\alpha_G \cdot D_G)) + ((1 / (2 \cdot k_{ocel}) \cdot \ln(D_{VZ} / D_G))) + (1 / (\alpha_{VZ} \cdot D_{VZ})))$$

$$k_{ocel} = 23,26$$

$$Q_{skut} = k_c \cdot t_{log} \cdot s_{tep}$$

"skutečný výkon chladiče [W]"

a = 0,063	alfa_G = 14,99	alfa_{VZ} = 60,94
cp_G = 750,7	cp_{Gx} = 3,371	cp_{VZ} = 1,309
eps_L = 1	eps_R = 1,811	eps_t = 1,015
k_{C4H10} = 0,1058	k_{C7H8} = 0,06918	k_{CH4} = 0,1002
μ_{C3H8} = 0,00002007	μ_{C4H10} = 0,00001879	μ_{C7H8} = 0,00001841
m_{vz} = 0,2632	NusP_G = 27,2	NusT_{VZ} = 203,2
Pr_{C4H10} = 0,6176	Pr_{C7H8} = 0,6773	Pr_{CH4} = 0,9195
Q_{CH} = 47,98	Q_{skut} = 15729	R = 0,239
ρ_{C4H10} = 0,8633	ρ_{C4H10N} = 2,705	ρ_{C7H8} = 1,372
ρ_{VZ} = 0,8952	ρ_{vz,N} = 1,293	S_G = 0,0628
T_N = 0	T_{S,VZ} = 373,2	T_{VZ,IN} = 20
V_{VZH} = 1059	V_{vz,N} = 0,2036	w_G = 0,6901

Obrázek 11-1: Výsledky z programu EES

$b = 0,371$	$cp_{C_3H_8} = 3,506$	$cp_{C_4H_{10}} = 3,478$
$cp_{VZ} = 1,013$	$D_G = 0,4$	$d_h = 0,1077$
$k_1 = 0,9739$	$k_{1,G} = 166,8$	$k_2 = 63,6$
$k_G = 0,09617$	$k_{o_{cel}} = 23,26$	$k_{VZ} = 0,03231$
$\mu_{CH_4} = 0,00002331$	$\mu_G = 0,00002014$	$\mu_{VZ} = 0,00002233$
$v_G = 0,00002576$	$v_{VZ} = 0,00002495$	$O_o = 0,868$
$Pr_G = 0,7143$	$Pr_{VZ} = 0,6999$	$P_N = 101,3$
$Re_G = 6546$	$Re_{kr,ii} = 12189$	$Re_{VZ} = 54318$
$\rho_{C_7H_8N} = 885,4$	$\rho_{CH_4} = 0,2381$	$\rho_{CH_4N} = 0,7175$
$S_{lep} = 2,541$	$S_{VZ} = 0,02337$	$T_{G,IN} = 700$
$T_{VZ,OUT} = 200$	$V_G = 0,04334$	$V_{GH} = 156$
$w_{VZ} = 12,58$	$x = 1,293$	$x_2 = 0,61$

Obrázek 11-2: Výsledky z programu EES